

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA  
INGENIERIA EN GEOLOGÍA



TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN GEOLOGÍA**

TEMA:

**“CORRELACIÓN LITO-ESTRATIGRÁFICA Y MINERALÓGICA  
HIDROTHERMAL DE 8 POZOS DE LA ZONA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO  
GEOTÉRMICO SAN JACINTO-TIZATE”**

PRESENTADO POR:

**Br. Víctor Hugo González Vílchez**

TUTOR:

**MSc. Guillermo Chávez Ardanza**

ASESORA:

**MSc. Magdalena Pérez López**

Managua, Octubre 2016

---

### Dedicatoria

A mis padres, Juanita Vílchez Picado y Juan Ramón González, quienes con su inconmensurable cariño y voluntad me han apoyado incondicionalmente en todo momento, y por ser el impulso para culminar con éxito esta etapa de mi vida, y su deseo y esfuerzo por brindarme un futuro mejor.

A mi hermana Grethel, mi gemela a destiempo, quien supo entender la distancia sin que el amor y el apego se enfriaran.

A mi familia: tíos, tías, primos, primas y abuelo Sabino, quienes indirectamente han sido partícipes de este logro.

Y especialmente a mi primo Rolando (q.e.p.d), a quien voy a extrañar de por vida.

Esto es para ustedes, cariñosamente.

### Agradecimientos

A Dios, por Sus incontables bendiciones, Su protección en todo momento y por darme fuerzas para continuar y superar los obstáculos, retos y dificultades a lo largo de mi vida.

A mi familia, que siempre me ha apoyado y siempre estuvieron pendientes de mí, acompañándome en todo el proceso, aún desde la distancia.

A la empresa Polaris Energy Nicaragua, S.A. (PENSA), por depositar en mí un gran voto de confianza al darme la oportunidad de realizar en conjunto con ellos este trabajo y brindarme conocimientos y experiencia de calidad. A todos y cada uno de sus colaboradores, que siempre estuvieron anuentes a resolver cualquier duda y a incluirme en su equipo de trabajo.

A mi tutor, MSc. Guillermo Chávez Ardanza, por su excelente guía en este trabajo, y por compartir de sus conocimientos y experiencias, sus comentarios, observaciones, tiempo y paciencia a lo largo de esta etapa.

A mi asesora, MSc. Magdalena Pérez López, por creer en mí persona, por el apoyo y la confianza brindada aún sin conocerme, por todos sus conocimientos compartidos, por abrirme las puertas de su casa y atenderme cada vez que lo necesitaba, por su cariño, cordialidad y sus valiosos consejos.

A mi maestra, MSc. Juanita Ruiz, por ser una persona clave en mi vida, y por su voluntad de apoyar mi formación profesional. Por las observaciones, comentarios, y consejos.

A los miembros del jurado, quienes han estado a cargo de la revisión de este trabajo, por su tiempo, disponibilidad, comentarios y observaciones.

A mis mejores amigas, mis hermanas de otra madre, Dayana y Gabriela, y a los demás amigos, mi familia escogida, quienes individual o colectivamente han sabido apoyarme en cada etapa, por permanecer ahí siempre que lo necesité. A todas y cada una de las personas que consciente o inconscientemente contribuyeron a la realización de este trabajo:

¡Gracias totales!

## **RESUMEN**

El área de estudio se localiza dentro de la Cordillera Volcánica de Los Maribios, al Este del Complejo Volcánico Telica, en el Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate. La evolución de este sector está definida por sucesivas fases de actividad volcano-tectónica que han sido acompañadas por un progresivo desplazamiento del centro de emisión hacia el Oeste, siendo su actual centro eruptivo el Volcán Telica.

Para este estudio se incluyeron 8 pozos de la zona de producción, 3 verticales y 5 direccionales, a los cuales se revisó tanto macroscópica como petrográficamente.

Lito-estratigráficamente, en la zona productiva del Campo, se reconocieron 4 unidades estratigráficas principales: Unidad 1 – Volcanoclásticos y lavas jóvenes, Unidad 2 – Tobas y lavas y escorias intercaladas, Unidad 3 – Lavas y tobas intercaladas.

Mineralógicamente, se delimitaron 3 zonas de alteración hidrotermal: Zona esmectita-zeolitas, Zona Arcillas intercaladas-Clorita-Illita y Zona Epidota-Clorita-Illita-Wairakita, las cuales se caracterizan por las asociaciones mineralógicas en equilibrio desarrolladas durante la alteración de las rocas reflejando las condiciones de temperatura, presión, química del fluido y de la roca originaria.

Las características litológicas, estratigráficas y mineralógicas de estos pozos permitieron la realización de una Correlación Lito-Estratigráfica y una Correlación Mineralógica Hidrotermal entre ellos, tomando como referencia 3 perfiles: un perfil Noreste-Suroeste, un perfil Este-Oeste, y un perfil Noroeste-Sureste.

## ÍNDICE

### RESUMEN

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 LOCALIZACIÓN	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.4 METODOLOGÍA	6
1.4.1 TRABAJO DE GABINETE	7
1.4.2 ETAPA DE LABORATORIO	7
1.4.3 ETAPA FINAL	8
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
2.1 ALTERACIÓN HIDROTERMAL	9
2.1.1 PROCESOS DEBIDOS A LA ALTERACIÓN HIDROTERMAL	11
2.1.2 CLASIFICACIÓN DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL	13
<b>CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO-GEOTERMAL DEL ÁREA</b>	<b>15</b>
3.1 TECTÓNICA DE NICARAGUA Y AMÉRICA CENTRAL	15
3.2 GEOLOGÍA REGIONAL DE NICARAGUA	16
3.3 GEOLOGÍA DEL CAMPO	21
3.3.1 GEOLOGÍA LOCAL	21
3.3.2 GEOLOGÍA LOCAL SUPERFICIAL	21
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS LITO-ESTRATIGRÁFICO</b>	<b>24</b>
4.1 LITO-ESTRATIGRAFÍA DEL CAMPO SAN JACINTO-TIZATE	24
4.2 UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	26
4.2.1 PERFIL NORESTE-SUROESTE	29
4.2.2 PERFIL ESTE-OESTE	36
4.2.3 PERFIL NOROESTE-SURESTE	40

<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS MINERALÓGICO .....</b>	<b>45</b>
<b>5.1 MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO SAN JACINTO-TIZATE .....</b>	<b>45</b>
5.1.1 MINERALOGÍA PRIMARIA .....	45
5.1.2 MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN .....	45
5.1.3 ASOCIACIONES MINERALÓGICAS .....	48
<b>5.2 ZONAS DE ALTERACIÓN MINERALÓGICA HIDROTERMAL .....</b>	<b>50</b>
5.2.1 PERFIL NORESTE-SUROESTE.....	52
5.2.2 PERFIL ESTE-OESTE.....	57
5.2.3 PERFIL NOROESTE-SURESTE.....	59
<b>CAPÍTULO VI: CORRELACIÓN DE DATOS .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1 CORRELACIÓN LITO-ESTRATIGRÁFICA .....</b>	<b>64</b>
6.1.1 CORRELACIÓN LITO-ESTRATIGRÁFICA DEL PERFIL NORESTE-SUROESTE.....	64
6.1.2 CORRELACIÓN LITO-ESTRATIGRÁFICA DEL PERFIL ESTE-OESTE.....	67
6.1.3 CORRELACIÓN LITO-ESTRATIGRÁFICA DEL PERFIL NOROESTE-SURESTE.....	70
<b>6.2 CORRELACIÓN MINERALÓGICA .....</b>	<b>73</b>
6.2.1 CORRELACIÓN MINERALÓGICA DEL PERFIL NORESTE-SUROESTE.....	73
6.2.2 CORRELACIÓN MINERALÓGICA DEL PERFIL ESTE-OESTE .....	76
6.2.3 CORRELACIÓN MINERALÓGICA DEL PERFIL NOROESTE-SURESTE.....	78
<b>CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES .....</b>	<b>84</b>
<b>CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>85</b>
<b>CAPÍTULO X: ANEXOS .....</b>	<b>88</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio ubicada en la zona productiva del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, en el departamento de León .....	3
Figura 2. Minerales comunes de alteración hidrotermal y sus rangos de temperatura de estabilización (Tomado de Lagat, 2010) .....	10
Figura 3. Entorno tectónico de la Placa Caribe (Acton et al, 2000) .....	15
Figura 4. Provincias Geológicas de Nicaragua (modificado de Hodgson G, 1998) .....	17
Figura 5. Mapa geológico superficial del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate (modificado de White, P. et al (2008)) .....	23
Figura 6. Sección transversal geológica Norte-Sur del campo San Jacinto-Tizate. (Ostapenko, 1998) .....	25
Figura 7. Ubicación de los perfiles de correlación dentro del área de estudio .....	28
Figura 8. Perfil de correlación 1: Noreste-Suroeste (A-A').....	29
Figura 9. Perfil de correlación 2: Este-Oeste (B-B').....	36
Figura 10. Perfil de correlación 3: Noroeste-Sureste (C-C').....	40
Figura 11. A) Nícoles paralelos, aumento 20X. Actinolita fibrosa subhedral desarrollada sobre un cristal subhedral de plagioclasea en muestra de -1980 msnm. Se observa un cristal de epidota en el borde superior. B) Nícoles cruzados, aumento 20X .....	53
Figura 12. A) Vena de epidota a los -1592 msnm. B) Cristal subhedral de actinolita fibrosa en lámina de -2092 msnm. C) Matriz alterada a pennina a los -2092 msnm. D) Cristales euhedrales de prehnita y adularia en -2092 msnm. Todas en nícoles cruzados y con aumento de 20X .....	55
Figura 13. A) Fragmento cloritizado con venas de illita-esmectita en lámina de 430 m (-256 msnm), aumento de 10X. B) Agregado cristalino de epidota subhedral en un fragmento alterado a cuarzo en muestra de 1555 m (-1381 msnm), aumento de 10X. C) Cristal de epidota euhedral desarrollado sobre wairakita a los 1555 m (-1381 msnm), aumento de 20X. Todas en nícoles cruzados .....	60
Figura 14. Correlación Lito-Estratigráfica del perfil Noreste-Suroeste.....	66
Figura 15. Correlación Lito-Estratigráfica del perfil Este-Oeste .....	69
Figura 16. Correlación Lito-Estratigráfica del perfil Noroeste-Sureste.. .....	72
Figura 17. Correlación Mineralógica hidrotermal del perfil Noreste-Suroeste.....	75
Figura 18. Correlación Mineralógica hidrotermal del perfil Este-Oeste .....	77
Figura 19. Correlación Mineralógica hidrotermal del perfil Noroeste-Sureste .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del área de estudio .....	2
Tabla 2. Datos de los pozos correlacionados.....	6
Tabla 3. Productos típicos de alteración hidrotermal (Browne, 1984) .....	11
Tabla 4. Unidades lito-estratigráficas de los pozos del Perfil Noreste-Suroeste.....	26
Tabla 5. Unidades lito-estratigráficas de los pozos del Perfil Este-Oeste .....	27
Tabla 6. Unidades lito-estratigráficas de los pozos del Perfil Noroeste-Sureste .....	27
Tabla 7. Límites inferiores de la capa sello del reservorio del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate .....	50
Tabla 8. Zonas mineralógicas hidrotermales de los pozos del Perfil Noreste-Suroeste.....	51
Tabla 9. Zonas mineralógicas hidrotermales de los pozos del Perfil Este-Oeste .....	51
Tabla 10. Zonas mineralógicas hidrotermales de los pozos del Perfil Noroeste-Sureste...	51



## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

El aprovechamiento del recurso geotérmico ha sido viable en Nicaragua, debido a las condiciones geológicas regionales relacionadas a la zona de subducción formada por la Placa Cocos y la Placa Caribe, lo cual ha dado origen al Graben Nicaragüense y a la Cordillera Volcánica de Los Maribios, que se extiende paralela a la Costa del Pacífico y está compuesta por volcanes activos, estructuras volcánicas residuales, lagunas cratéricas y calderas volcánicas que presentan áreas de actividad hidrotermal que denotan una fuerte presencia de cuerpos magmáticos a profundidad.

Este trabajo monográfico presenta los resultados del análisis de artículos e información previa de la zona de interés, así como los datos obtenidos de la interpretación de los análisis de recortes de perforación, láminas delgadas, pruebas de difracción de rayos X y de azul de metileno efectuadas previamente, y la evaluación de las etapas ejecutadas, dando como resultado la Correlación Litoestratigráfica y Mineralógica Hidrotermal de 8 pozos de la Zona de Producción del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate.

Se evaluaron las características litológicas y mineralógicas de los pozos incluidos con el fin de realizar una interpretación que generara resultados aplicables a la geotermia a través de la elaboración de perfiles de unidades estratigráfica y de zonas de alteración hidrotermal.

Se pretende que la realización de esta monografía contribuya a tener una visualización clara de la distribución litológica y la alteración hidrotermal del subsuelo de la zona productiva del Campo Geotérmico.

## 1.1 LOCALIZACIÓN

El área de estudio se localiza en el Departamento de León, al occidente del país, en la Concesión del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate, otorgada a la empresa Polaris Energy Nicaragua, S.A. (Figura 1). Esta concesión se encuentra a una distancia de 114 km al NO de Managua y a 10 km al NE del municipio de Telica. Geográficamente se ubica al Este de la Cadena Volcánica Los Maribios, hoja topográfica Telica, número 2853 IV, editada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2006), a escala 1:50 000.

La Concesión del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate cubre un área de 40 km<sup>2</sup>, sin embargo, el área de estudio es de 1.8 km<sup>2</sup>, en la zona productora del Campo, en donde se encuentran 11 pozos geotérmicos. Algunos de ellos direccionales y con perforaciones adicionales productivas llamadas "fork leg" o perforaciones adicionales cementadas llamadas "side track".

En la Tabla 1 se muestran las coordenadas del área de estudio.

Punto	Este (X)	Norte (Y)
1	524000	1393800
2	525430	1393800
3	525430	1392630
4	524000	1392630

*Tabla 1 – Coordenadas del área de estudio  
(Proyección UTM, Datum WGS 84)*

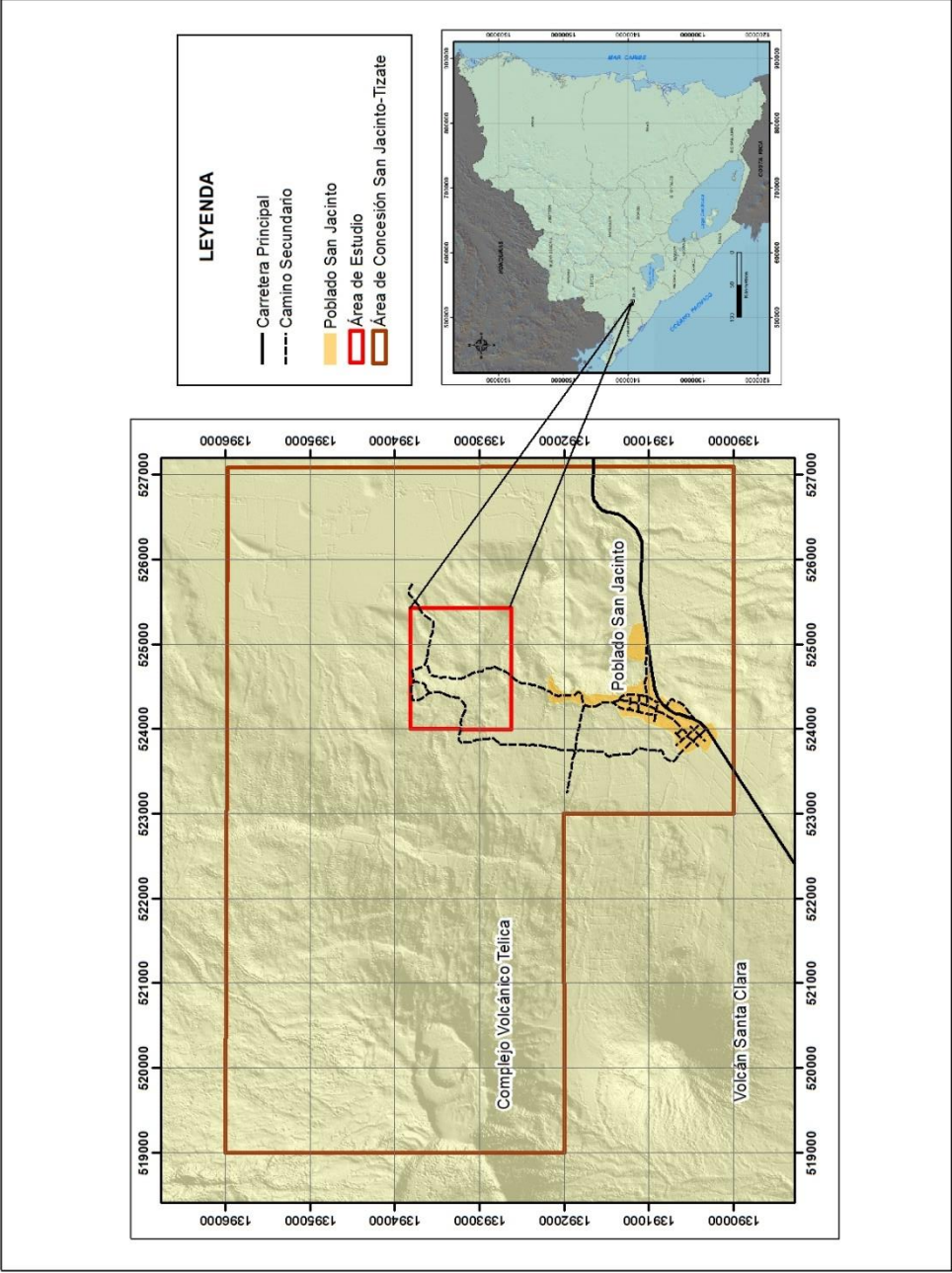


Figura 1: Área de estudio ubicada en la zona productiva del Campo Geotérmico San Jacinto Tizate, en el departamento de León.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La energía renovable es una de las esferas más importantes del sector energético, debido a su capacidad para reducir costos, reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), contaminación ambiental y para aprovechar fuentes de energía locales y descentralizadas como los recursos eólicos, solares, geotérmicos, hidroeléctricos y de biomasa. Estas fuentes renovables son inmunes a la volatilidad de los mercados de combustibles fósiles y adicionalmente conllevan el beneficio de estimular el empleo, el desarrollo tecnológico y el crecimiento económico (ICEIDA-MEM, 2008).

Nicaragua es un país dotado de un importante potencial geotérmico, el cual está íntimamente ligado a la presencia en su territorio de la cordillera volcánica activa que se extiende a lo largo de la costa del Pacífico.

Los estudios realizados en el Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate, tanto los de tipo específico como los de tipo regional, han dejado una valiosa cantidad de información geocientífica, que incluye datos de tipo geológico, vulcanológico, geoquímico, hidrológico, geofísico así como datos del subsuelo y del yacimiento geotérmico. Sin embargo, a pesar de los aportes de todos estos estudios, aún no se ha logrado establecer una correlación litológica y estratigráfica general del campo geotérmico. Se suma a esto la falta de una correlación mineralógica definida para esta misma zona.

Se pretende que este trabajo aporte al conocimiento de las características geológicas subsuperficiales de la zona de estudio, ya que por medio del mismo se puede tener una visión más completa de la historia geológica de la zona, y por medio de la presentación de secciones geológicas y análisis de facies lograr conocer la continuidad o discontinuidad de las formaciones o unidades geológicas.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL:**

Realizar una Correlación Lito-Estratigráfica y Mineralógica Hidrotermal entre 8 pozos de la zona de producción del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate a través de la elaboración de secciones transversales.

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Realizar secciones transversales representativas de la zona de producción del Campo Geotérmico.
- Correlacionar mediante la agrupación de rocas de composición similar en unidades litológicas a través de la revisión de los recortes de perforación y los análisis petrográficos de láminas delgadas, con ayuda de las libretas y reportes geológicos de los pozos incluidos en este trabajo.
- Definir una correlación entre las zonas de alteración hidrotermal de cada pozo implicado, interpretadas en base a la temperatura de formación de los minerales secundarios, y en los resultados de las pruebas de Azul de Metileno y de Difractometría de Rayos X efectuadas previamente.

## 1.4 METODOLOGÍA

Con el objetivo de realizar la correlación lito-estratigráfica y mineralógica se procedió a analizar la información del área plasmada en reportes técnico-geológicos de pozos, anotaciones de las descripciones macro y micrométricas efectuadas por los geólogos de pozo y resultados de las pruebas de Azul de Metileno y de Difracción de Rayos X, y paralelamente se realizó una revisión macroscópica y petrográfica de los recortes de perforación con uso del estéreomicroscopio o lupa binocular marca Motic modelo SMZ-168, y el microscopio petrográfico marca Motic modelo BA300Pol, para la identificación de la composición mineral primaria y secundaria, estructura, clasificación de la roca y grado de alteración hidrotermal, y posteriormente establecer las unidades litoestratigráficas y mineralógicas de los pozos revisados.

El resultado de esta revisión facilitó la realización de:

- ✓ Correlación Lito-Estratigráfica
- ✓ Correlación Mineralógica

Los pozos correlacionados son: SJ3-1, SJ5-1, SJ6-1, SJ9-1, SJ9-2, SJ9-3F<sup>1</sup>, SJ12-2, SJ12-3. En la Tabla 2 se muestran los datos y características de estos pozos. Las profundidades de estos pozos varían entre 1200 a 2390m en profundidad medida (MD<sup>2</sup>).

Pozo	Coordenadas		Elevación (msnm)	Profundidad		Orientación	Estado	Fecha de inicio de perforación	Fecha de fin de perforación
	mE	mN		m MD	m TVD				
<b>SJ3-1</b>	524073	1393520	186	1871		Vertical	Monitoreo	30-sep-93	06-dic-93
<b>SJ5-1</b>	524467	1393394	167	2339		Vertical	Productor	5-may-94	17-jul-94
<b>SJ6-1</b>	524070	1393307	174	1881		Vertical	Productor	14-ago-94	04-dic-94
<b>SJ9-1</b>	524449	1393172	161	1200	1187.37	300/30	Productor	26-oct-07	20-nov-07
<b>SJ9-2</b>	524450	1393166	161	1388	1364.49	210/35	Cementado	25-nov-07	09-ene-08
<b>SJ9-3F</b>	524451	1393160	161	1975	1904	105/45	Productor	15-sep-13	28-nov-13
<b>SJ12-2</b>	524842.3	1393687.7	202	2295.8	2213.4	206/20	Productor	30-nov-10	22-ene-11
<b>SJ12-3</b>	524858	1393680	202	2390.4	2304.8	85/15	Productor	19-jul-11	23-ago-11

Tabla 2. Datos de los pozos correlacionados. Fuente: Base de Datos de Polaris Energy Nicaragua, S.A.

<sup>1</sup> F (forkleg): perforación realizada en un pozo existente, a determinada profundidad y con diferente dirección y ángulo respecto al original, pero ambos en funcionamiento.

<sup>2</sup> MD: Measured Depth, profundidad medida del agujero sin referencia a la vertical.

Posteriormente se efectuaron 3 secciones transversales, distribuidas de la siguiente manera:

1 en dirección Noreste-Suroeste:

- SJ12-2, SJ5-1, SJ9-2

1 en dirección Este-Oeste:

- EW: SJ3-1, SJ5-1, SJ12-3.

1 en dirección Noroeste-Sureste:

- EW\_S: SJ6-1, SJ9-1, SJ9-3F.

La metodología propuesta comprendió diversas etapas de estudio, divididas de la siguiente manera:

#### *1.4.1 Trabajo de Gabinete:*

Comprendió una revisión exhaustiva de la información bibliográfica, documentos de geología, vulcanología y de los reportes petrográficos de los pozos en cuestión, elaborados en las fases de perforación ejecutadas en años anteriores a partir de los recortes de perforación y láminas delgadas.

Se usó como referencia geográfica la hoja topográfica Telica 2853-IV, editada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), a escala 1:50 000.

Se dispuso de un tiempo de entrenamiento en el microscopio petrográfico y en el estéreomicroscopio (lupa binocular), en el cual se reforzaron los conocimientos previos en cuanto a identificación de minerales en muestras macro y micrométricas.

#### *1.4.2 Etapa de Laboratorio:*

Consistió de una revisión de secciones delgadas en el microscopio petrográfico, donde se conocieron las variaciones texturales de las rocas, los minerales primarios y secundarios producto de la alteración hidrotermal. Macroscópicamente se observaron los recortes de perforación utilizando la lupa binocular, lográndose reconocer la composición mineral y textural de los distintos paquetes de rocas de cada uno de los pozos incluidos.

Se analizaron los resultados de las Pruebas de Azul de Metileno, las cuales sirven para determinar los niveles de arcilla en una muestra de roca y correlacionar así la capa sello del reservorio. Además, se tomaron en cuenta los resultados de las pruebas de Difracción de Rayos X.

#### *1.4.3 Etapa Final:*

En esta etapa se procesó toda la información obtenida de la revisión petrográfica y se agruparon paquetes de tobas y lavas de similar composición y características, en unidades estratigráficas definidas por Ostapenko et al (1998). La metodología utilizada para la definición de zonas hidrotermales surgió a partir del análisis de diferentes tipos de metodologías utilizadas en países como El Salvador, Kenia y Nueva Zelanda, y tratar de agrupar los minerales por asociaciones de rangos de temperaturas.

Se elaboraron 3 secciones transversales. Una sección Noreste-Suroeste, una sección Este-Oeste y una sección Noroeste-Sureste, para tener una mejor visión de la subsuperficie del Campo.

En total, se crearon 6 perfiles de correlación: 3 perfiles de unidades lito-estratigráficas con sus correspondientes perfiles de zonas de alteración hidrotermal. Se utilizó el software AutoCad Architecture para elaborar estos perfiles de correlación.

Finalmente se sintetizaron las actividades realizadas durante las etapas del trabajo, incluyendo principalmente el reconocimiento de investigaciones anteriores, el cumplimiento de los objetivos propuestos y la exposición de los resultados obtenidos.



## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 ALTERACIÓN HIDROTHERMAL**

La existencia de sistemas geotermales es a menudo, pero no siempre, caracterizada por ciertas manifestaciones superficiales que incluyen manantiales termales, fumarolas, lodos hirvientes y alteración hidrotermal del suelo y rocas (Arnórsson, 2000). La alteración hidrotermal es el resultado de la interacción de fluidos, generalmente dominados por agua, con las rocas preexistentes a temperaturas menores de 100°C hasta 500°C.

Se distinguen dos tipos de alteración hidrotermal: la hipogénica provocada por soluciones ascendentes, y supergénica producida por aguas meteóricas descendentes. La distribución y mineralogía de alteración depende del sistema hidrotermal existente y del tipo de yacimiento. Esta interacción agua-roca genera halos de reacción con espesores variables, entre unos pocos centímetros hasta varios o cientos de metros. Los minerales de alteración proporcionan información acerca del reservorio, las características de los fluidos y la evolución del sistema hidrotermal, y el estudio se aplica en la evaluación de recursos geotérmicos (Monterroso, 2013).

La alteración hidrotermal consiste en cambios mineralógicos, texturales y químicos de las rocas debido a un cambio ambiental por la reacción con agua caliente, vapor o gas. Consiste en la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales o precipitación y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circula por la misma.

Aunque la composición litológica original de la roca tiene una influencia en la mineralogía secundaria, su efecto es menor debido a la permeabilidad, temperatura, presión y composición del fluido (Maksaev, 2001). O sea, la temperatura del fluido, el pH y Eh<sup>3</sup> del mismo, la duración del flujo dentro de la roca, la ocurrencia de ebullición y condiciones hidrológicas locales son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal.

---

<sup>3</sup> Potencial redox (es como se conoce a la tendencia de las especies químicas en una reacción redox a adquirir electrones.)

Durante largos períodos, la actividad geotermal cambia en intensidad y localización, aunque muchos cambios sucederán con eventos no relacionados directamente con la actividad termal, como la erosión, movimientos de tierra o actividad volcánica (Browne, 1978).

Frecuentemente se producen cambios en los colores de la roca, resultando colores claros a veces hasta blancos, dependiendo de los nuevos minerales formados. La alteración hidrotermal produce también cambios en las propiedades de las rocas alterando su densidad, porosidad y permeabilidad. Una roca alterada generalmente es más porosa y más liviana que la roca fresca, muchas veces la alteración hidrotermal abre los espacios necesarios para una mineralización posterior. Sin embargo la alteración arcillosa reduce la permeabilidad de las rocas.

Los minerales nuevos dependen en primer lugar de la temperatura de las soluciones (Figura 2). Para temperaturas altas entre 300°C a 400°C los minerales característicos son granates, anfíboles, piroxenos, turmalina y biotita; entre 200°C-300°C se forman sericita, clorita, carbonatos y sílice. Los productos característicos de las soluciones epitermales con temperatura entre 100°C y 200°C y subvolcánicas son clorita, carbonatos, adularia y arcillas (Tabla 3).

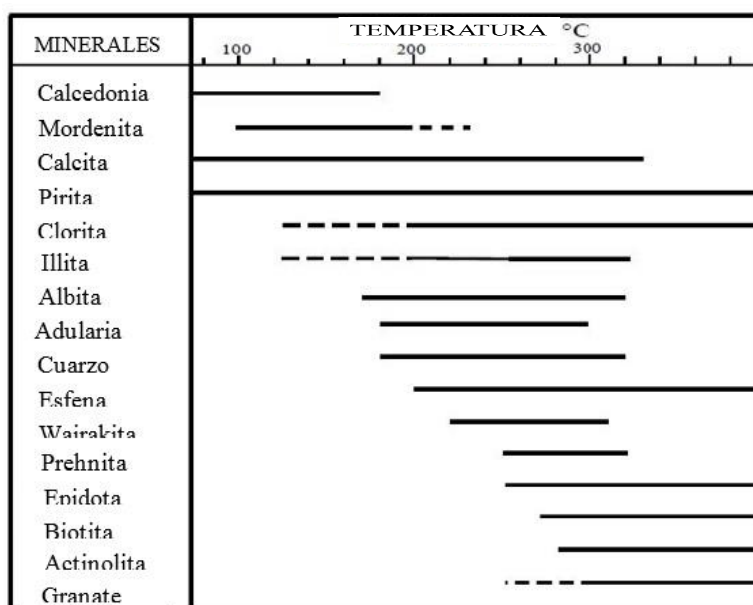


Figura 2: Minerales comunes de alteración hidrotermal y sus rangos de temperatura de estabilización. Las líneas punteadas indican posibles temperaturas de estabilización (Tomado de Lagat, 2010).

Mineral Original	Producto de reemplazamiento
Vidrio volcánico	Zeolitas, cristobalita, cuarzo, calcita, arcillas
Magnetita/ ilmenita/ titano-magnetita	Pirita, leucoxenos, titanita, pirrotina, hematita
Piroxeno/ anfíbol/ olivino/ biotita	Clorita, illita, cuarzo, pirita, calcita, anhidrita
Plagioclasa cálcica	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita, clorita, illita, caolin, montmorillonita, epidota
Anortoclasa/ sanidina/ ortoclasa	adularia

*Tabla 3: Productos típicos de alteración hidrotermal (Browne, 1984).*

Estas interacciones también generan cambios químicos y físicos. Muchas alteraciones se pueden describir con un intercambio de cationes por iones hidronio. En cuanto a las propiedades físicas también estas se ven influenciadas, la susceptibilidad magnética usualmente disminuye, pero puede aumentar cuando se deposita magnetita hidrotermal. La resistividad eléctrica generalmente decrece porque los sulfuros metálicos permiten el paso de corrientes eléctricas, pero masas silíceas producto de alteración pueden ser más resistentes.

Los minerales primarios de origen magmático son inestables al contacto con los fluidos geotérmicos, como un resultado de las diferencias entre las condiciones magmáticas y el nuevo ambiente, creado por la invasión de los fluidos geotérmicos. Las reacciones químicas tienden hacia un nuevo equilibrio entre los minerales y el fluido geotérmico mediante una serie compleja de desvitrificación, recristalización, solución y reacciones de deposición. La textura original de la roca puede ser modificada ligeramente o completamente obliterada por la alteración hidrotermal (Maksaev, 2001).

### 2.1.1 Procesos debidos a la alteración hidrotermal

#### a) Depositación directa

Es el tipo de alteración más común y muchos de los minerales hidrotermales encontrados en campos geotérmicos han sido depositados directamente desde una solución. Para que se dé esta deposición se necesita que la roca de reservorio contenga espacios abiertos donde el

fluido se pueda transportar, esto incluye diaclasas, fallas, inconformidades, vesículas, poros y fisuras.

Cuarzo, calcita y anhidrita pueden fácilmente rellenar vetillas o vesículas, pero clorita, illita, adularia, piritita, pirrotina, hematita, wairakita, fluorita, laumontita, mordenita, prehnita y epidota han sido observadas donde se hayan podido depositar directamente del fluido (Maksaev, 2001).

#### **b) Reemplazamiento**

Según Maksaev (2001), muchas rocas contienen minerales primarios los cuales son inestables en ambientes geotermales y estos tienden a ser reemplazados por nuevos minerales estables o al menos, metaestables bajo las nuevas condiciones.

En rocas de reservorio volcánicas es fácil distinguir entre minerales primarios y secundarios, pero en rocas sedimentarias o metamórficas de bajo grado esto se dificulta. Esto ocurre porque en los casos de rocas volcánicas, ellas contienen abundantes minerales que son estables en ambientes geotermales donde hay presencia de aguas álcali cloruradas.

#### **c) Lixiviación**

Este proceso toma lugar en los márgenes de los campos geotérmicos, por esta razón no se registra en los cortes o testigos de roca. Algunos de los componentes químicos de las rocas son extraídos por los fluidos hidrotermales al atravesarlas, particularmente cationes metálicos, de modo que la roca es deprimida en dichos componentes o lixiviada. En ciertas condiciones, como por ejemplo donde se condensa vapor acidificado por oxidación de  $H_2S$ , la solución ácida resultante (por la presencia de  $H_2SO_4$ ) ataca las rocas disolviendo minerales primarios, pero sin reemplazar los huecos resultantes que se producen. Esto puede en casos extremos resultar en una masa porosa de cuarzo residual.

En la alteración hidrotermal ciertos componentes son extraídos selectivamente de las rocas de caja y son agregados al fluido y otros componentes (incluyendo metales de mena), son selectivamente incorporados por las rocas (o forman una cubierta sobre ellas), y son removidos del fluido hidrotermal. Solo la roca alterada es el resultado visible del proceso, porque el fluido es removido del sistema, a excepción de posibles inclusiones fluidas en los minerales precipitados (Maksaev, 2001).

### 2.1.2 Clasificación de alteración hidrotermal

Para efectos de la Correlación Mineralógica Hidrotermal se ha utilizado una conjunción de criterios utilizados por Kristmannsdottir (1979), Teklemariam (1996), Mesfin (2010), Pichardo (2013) y Moneer (2015), los cuales clasifican la alteración hidrotermal en Zonas Mineralógicas. Estas zonas están caracterizadas por la abundancia de minerales particulares relativos al incremento de la temperatura y la profundidad. Los minerales comunes utilizados como indicadores geotermométricos son las arcillas, zeolitas, epidotas y anfíboles (Browne, 1978; 1984). Las 3 zonas de alteración hidrotermal ajustadas para los perfiles elaborados en este estudio son:

**Zona esmectita-zeolita:** Se caracteriza por la presencia de minerales arcillosos (esmectita, montmorillonita) sílice amorfa y zeolitas de baja temperatura, como estilbita, natrolita y laumontita.

Esta asociación mineral se forma en rocas silicatadas y altera la parte vítrea más inestable y consiguientemente más alterable.

Esta zona representa baja temperatura, en un rango entre 50 °C y 150 °C, donde domina el aporte de calor por conducción.

**Zona arcillas intercaladas-clorita-illita:** Aumenta la intercalación de arcillas illita - esmectita y clorita-esmectita y aparecen los de la fase de los filosilicatos, esencialmente clorita e illita. Además que aparecen en la parte más profunda de la zona.

El rango de temperaturas de formación es entre 150 °C y 230 °C.

**Zona epidota-clorita-illita-wairakita:** Los minerales son epidota, albita, wairakita, adularia, clorita, cuarzo, pirita, calcita, illita, prehnita y óxidos de hierro subordinados, y en esporádicas apariciones, actinolita. La epidota es el mineral índice de mayor abundancia en esta zona. Disminuye la presencia de zeolitas de media temperatura y minerales arcillosos. La presencia de la asociación mineral anterior indica una interacción muy activa y muy intensa entre el fluido geotérmico y la roca.

La roca alterada en esta zona se vuelve más rígida y más densa debido a la presencia de minerales neogénicos, por lo tanto la roca se vuelve más frágil. El desarrollo de eventuales

fracturas se mantiene o se desarrollan si la roca se ve sometida a presión hidráulica o térmica. Por este motivo, las rocas que muestran este estado de alteración, además de demostrar que súbitamente se forman intensas reacciones con el fluido, tienen permanentemente características físicas que pueden formar un buen reservorio geotérmico. La permeabilidad va ligada al fracturamiento (Tomado de Monterroso, 2013).

El rango de temperaturas de formación es entre 230 °C y 260 °C.

## **CAPÍTULO III: MARCO GEOLÓGICO-GEOTERMAL DEL ÁREA**

### **3.1 TECTÓNICA DE NICARAGUA Y AMÉRICA CENTRAL**

Según Acton *et al* (2000), Centroamérica está localizada en la Placa Caribe, en el frente de un borde convergente destructivo, formado por la subducción de la Placa Cocos bajo dicha placa. En su extremo Norte se ubica la Placa Norteamericana, separada de la Placa Caribe por el sistema de fallamiento transcurrente denominado Polochic-Motagua, limitada al Sur y al Este por la Placa Sudamericana y al Oeste por la Placa Cocos. La Placa Caribe en su costa Oeste está delimitada por la Fosa Mesoamericana, la cual se encuentra a 100 km del Continente en el Océano Pacífico, es paralela a la Depresión Nicaragüense, tiene una profundidad de 6 km en su terminal en Guatemala, atraviesa toda Centroamérica y desaparece al Sur del istmo, en Panamá (Figura 3).

En el istmo centroamericano la Placa Caribe está dividida en dos elementos estructurales: el Bloque Chortis que conforma América Central del Norte y el Bloque Chorotega de América Central Sur. Es importante señalar que Nicaragua se ubica en la zona Oeste de la Placa Caribe, siendo afectada por el límite de placas que se desarrolla entre las Placas Cocos y Caribe (zona de subducción).

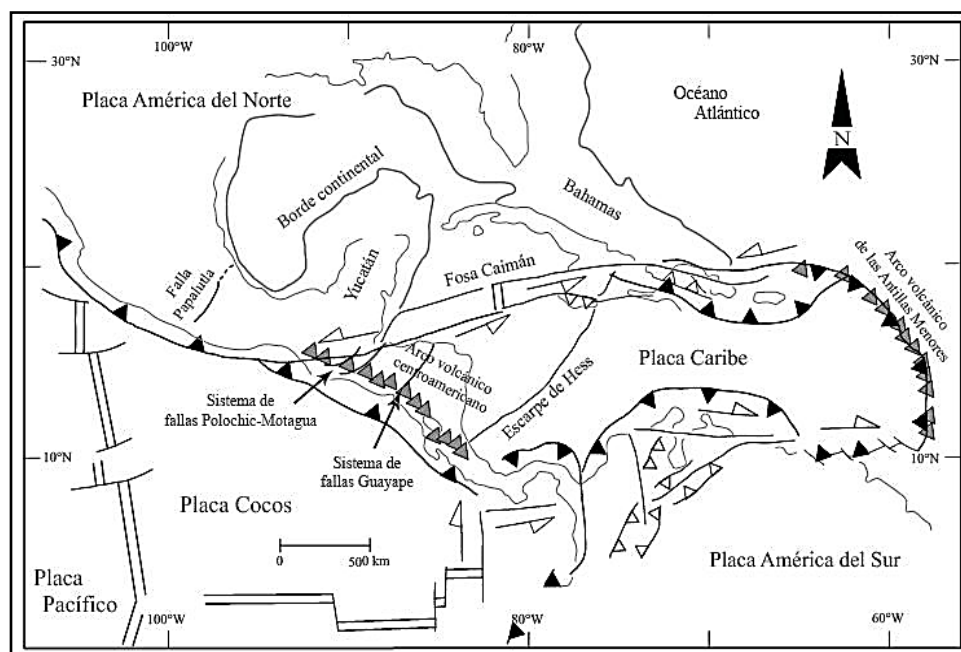


Figura 3. Entorno Tectónico de la Placa Caribe (Acton *et al*, 2000).

### 3.2 GEOLOGÍA REGIONAL DE NICARAGUA

La geología histórica de Nicaragua comenzó durante la era del Paleozoico y culminó con la intensa actividad volcánica del Cuaternario. Durante el Paleozoico Medio Inferior y el Mesozoico, América Central estaba conformada por dos grandes provincias geológicas bien definidas: la Septentrional en el Norte y la Meridional en el Sur, culminando ambas en el Norte y Sur de Nicaragua respectivamente (Rivera, 2004).

Geológicamente, la Provincia Septentrional (que llega hasta la parte Norte de Nicaragua cubriendo las áreas de los departamentos de Nueva Segovia, parte de Jinotega, parte de la Región Autónoma del Atlántico Norte, etc.), representa una corteza continental asentada en rocas metamórficas paleozoicas sobre las cuales yacen rocas sedimentarias del Paleozoico, Mesozoico y rocas plutónicas.

La Provincia Meridional (que comprende la parte Sur de Nicaragua cubriendo áreas de departamentos como Río San Juan), está constituida por una corteza oceánica Cretácica con basamento de rocas ígneas básicas superpuestas por sedimentos marinos y volcánicos del Terciario.

Los diversos eventos geológicos proporcionan las características empleadas en la subdivisión del país en las diferentes Provincias Geológicas (Figura 4). Se diferencian cinco Elementos Estructurales y/o Provincias Geológicas principales de Nicaragua:

- ❖ Cuenca de Sedimentación de la Costa Atlántica (Provincia Geológica de los Llanos de la Costa Atlántica).
- ❖ Plataforma Paleozoica y Mesozoica (Provincia Geológica del Norte).
- ❖ Provincia Volcánica Terciaria (Provincia Geológica Central).
- ❖ La Cuenca de Sedimentación de la Costa del Pacífico (Provincia Geológica de la Costa del Pacífico).
- ❖ La Depresión o Graben de Nicaragua.



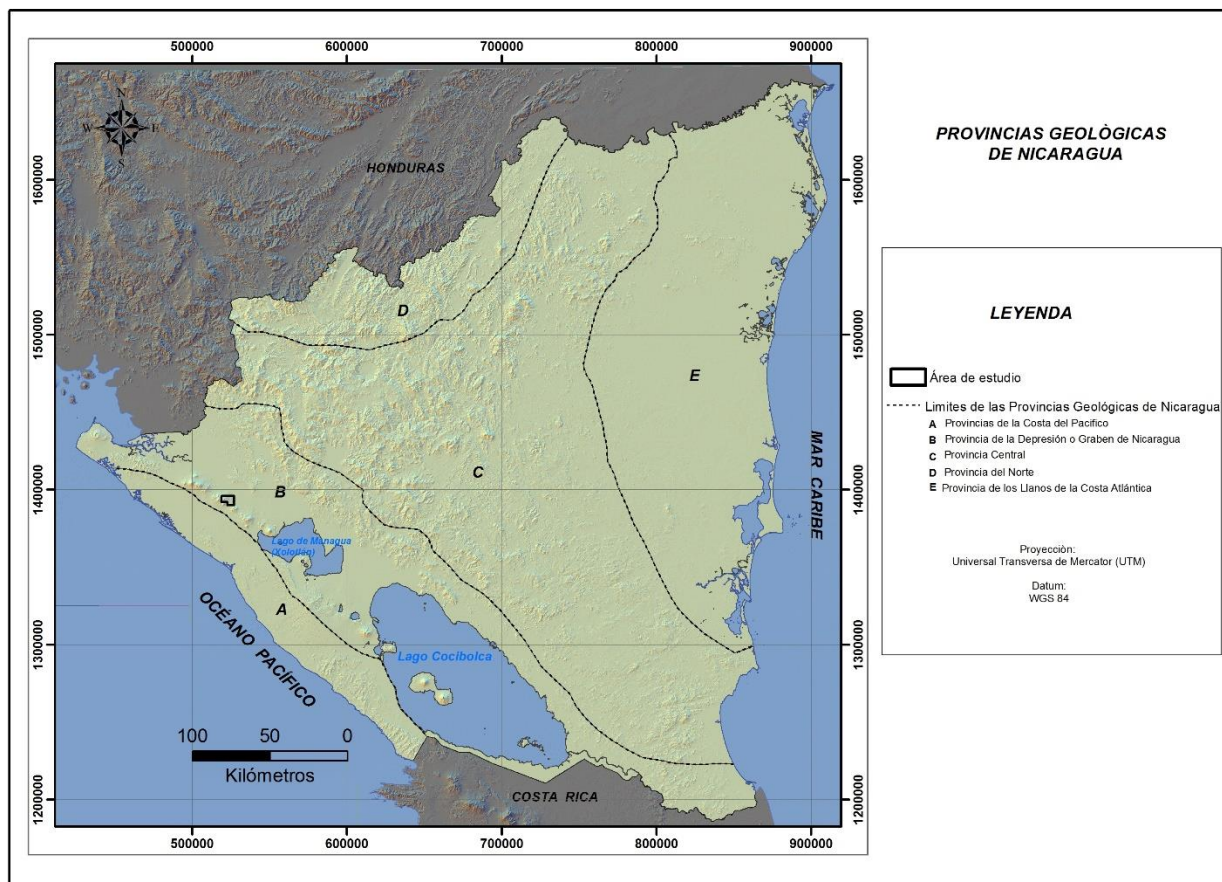


Figura 4. Provincias Geológicas de Nicaragua (modificado de Hodgson G, 1998).

### 2.3.1 Cuenca de Sedimentación de la Costa Atlántica (Provincia Geológica de los Llanos de la Costa Atlántica)

La provincia de la Costa Atlántica se encuentra limitada al Sur y Noroeste por la Provincia Volcánica Terciaria, al Oeste parcialmente por la plataforma Paleozoica y Mesozoica y al Este por el Mar Caribe (Rivera, 2004).

En la cuenca de La Mosquitia, la cual se localiza en esta Provincia, fueron depositados más de 5000 m de sedimentos de edad Terciaria, provenientes de la plataforma y de áreas volcánicas antiguas. Es una de las más grandes cuencas de América Central.

Las estructuras de fallas siguen rumbo Noreste-Suroeste y son aproximadamente paralelas al eje del anticlinal del río Coco.

La Costa Atlántica está cubierta por una franja de sedimentos jóvenes del Mioceno Pleistoceno que recubre parcialmente las formaciones volcánicas Terciarias y sedimentarias del Cretácico y Terciario inferior, constituidas por areniscas, lutitas y calizas que afloran en la región central. Se supone que el espesor de los sedimentos alcance algunas centenas de metros. Las capas superficiales del litoral están constituidas principalmente por arcillas y arena fina.

### **2.3.2 Plataforma Paleozoica y Mesozoica (Provincia Geológica del Norte)**

La plataforma Paleozoica y Mesozoica corresponde geológicamente a América Central Nuclear y la cuenca de Bocay. Geográficamente cubre el departamento de Nueva Segovia así como parte de Jinotega y de la Región Autónoma del Atlántico Norte. Al Este está cubierto por rocas volcánicas del Grupo Matagalpa y sedimentos de la cuenca de La Mosquitia. El margen Oeste está limitado aproximadamente por el Sistema de Fallas de Matiguás siguiendo el lineamiento Noroeste-Sureste de la Cordillera Amerrisque (interpretación de imágenes de radar, 1972). La estructura comprende rocas metamórficas, rocas sedimentarias plegadas y deformadas, interceptada por rocas plutónicas de la orogénesis Laramídica (Rivera, 2004).

La plataforma Paleo-Mesozoica está atravesada por la continuación hacia el Norte de la falla de Matiguás y la zona de fractura Isabelia por la zona de fractura Murra.

El núcleo metamórfico de la Provincia del Norte ocupa los sectores al occidente de la Provincia Central y está constituido por rocas metamórficas Paleozoicas (esquistos, filitas, cuarzitas, pizarras y rocas metavolcánicas) e intrusivos Cretácicos-Terciarios (granitos, granodioritas, dioritas, monzonita, cuarzo).

Las mesetas volcánicas y las serranías que circundan al núcleo metamórfico están constituidas por rocas sedimentarias Cenozoica/Mesozoicas (areniscas, conglomerados, lutitas, grauvacas, calizas) y rocas volcánicas Terciarias (basaltos, andesitas, ignimbritas, tobas y aglomerados) de los Grupos Coyol y Matagalpa, de edad Mioceno y Oligoceno respectivamente.

### **2.3.3 Provincia Volcánica Terciaria (Provincia Geológica Central)**

La Provincia Geológica Central comprende básicamente las siguientes regiones geológicas:

- La Provincia Volcánica del Coyol, incluyendo las mesas ignimbríticas que se extienden en dirección Noroeste-Sureste desde la frontera con Honduras hasta el Departamento del Río San Juan.
- La Provincia Volcánica de Matagalpa.
- La Provincia de Pre-Matagalpa.
- Los sectores, Central y Sur de la Provincia Central están cubiertos principalmente por depósitos volcánicos Terciarios (tobas, basaltos, andesitas e ignimbritas) que pertenecen a los grupos Matagalpa y Coyol y descansan generalmente sobre las formaciones sedimentarias Terciarias.

Los valles ubicados en el Centro y al Norte de la Provincia Geológica Central están rellenos con depósitos aluviales de arena, grava, limo y arcillas (Rivera, 2004).

### **2.3.4 Cuenca de Sedimentación de la Costa del Pacífico (Provincia Geológica de la Costa del Pacífico)**

Está situada en la Depresión de la Fosa Mesoamericana, llegando en el Sureste hasta la cuenca de Limón, en Costa Rica (Rivera, 2004).

La secuencia estratigráfica está representada por conglomerados, arenisca, limonita, grauvacas, lutita y caliza, alternado con series volcánicas de cenizas piroclásticas y lava. La edad se extiende desde el Cenomaniano hasta el Plioceno. Las rocas más antiguas de la Formación Rivas (Cretácico superior) afloran en el Sur, mientras las formaciones más jóvenes tales como El Fraile y Tamarindo del Mioceno, afloran en el Norte.

Durante el Mioceno, los depósitos de las cuencas de sedimentación del Pacífico fueron plegados, formando un gran anticlinal de rumbo Noroeste-Sureste. La formación de esta estructura tectónica fue acompañada por el surgimiento de sistemas de fallas paralelas y perpendiculares a la dirección principal del anticlinal.

A finales del Plioceno la cuenca del Pacífico sufrió un levantamiento, exponiendo las rocas de las formaciones a la superficie. La Formación El Salto con elevaciones mayores de 100 m.s.n.m asevera este movimiento tectónico.

### **2.3.5 Provincia Geológica de la Depresión o Graben Nicaragüense**

En esta Provincia se localiza el área de estudio, ubicado en el sector Este de la Concesión San Jacinto-Tizate (Figura 4). La caracterización de esta Provincia es la siguiente:

La Depresión o Graben Nicaragüense constituye una estructura tectónica joven, cruzando todo el Pacífico de Nicaragua desde el Golfo de Fonseca en el Noroeste, hasta la frontera con Costa Rica en el Sureste, alojada entre las dos estructuras más elevadas: el anticlinal de Rivas al Oeste y las Tierras Altas del Interior al Este (Rivera, 2004).

El Graben Nicaragüense se encuentra limitado por dos sistemas de fallas de rumbo Noroeste-Sureste y su origen está relacionado al movimiento de las Placas Cocos y Caribe, a la Fosa Mesoamericana y a la actividad volcánica reciente. Las fallas pertenecen al sistema centroamericano, que se extiende desde Guatemala hasta Costa Rica.

La Depresión se encuentra rellena con depósitos piroclásticos y aluvionales, que provienen de la erosión de las estructuras marginales y de los depósitos de origen volcánico como lapillis, cenizas y lavas. La cadena volcánica reciente, parcialmente activa, atraviesa la Depresión desde el Noroeste hasta el Sureste.

El Graben se formó en consecuencia de la falla que provocó un hundimiento de las regiones comprendidas entre las fracturas y fue acompañado por actividades volcánicas a lo largo de las fallas principales.

Los principales fallamientos del Graben Nicaragüense ocurren paralelamente a la Costa del Pacífico, sin embargo, hay algunas estructuras importantes, como las fallas de Nejapa y Tipitapa, que tienen una orientación Norte-Sur y forman el llamado Graben de Managua.

### **3.3 GEOLOGÍA DEL CAMPO**

#### **3.3.1 Geología Local**

La concesión San Jacinto-Tizate está localizada en la parte Este del Complejo Volcánico Telica (Figura 1), el cual es parte de la Cadena Volcánica Los Maribios. El volcán Telica ha tenido constantes eventos eruptivos, registrados desde la época de la Conquista Española hasta el más reciente en abril de 2016. Fumarolas de alta temperatura (350°C) de SO<sub>2</sub> son encontradas dentro del cráter central del Telica.

El volcán Telica es la parte más occidental del Complejo, una cresta con dirección Este-Oeste con un aparente incremento en edad hacia el Este, con el volcán Santa Clara localizado al Sur de la parte oriental del Complejo.

El vulcanismo más joven al Noreste de El Tizate parece ser los Domos Don Bosco, ubicados a 1 km al Este de la concesión. Éstos son dos domos de baja elevación, de composición riódacítica y de apariencia juvenil, rodeados por anillos de tobas. Al Este se encuentra un tercer anillo de toba que carece de un domo central, y remanentes de anillos antiguos al Noroeste. Según GeothermEx (2001), se establece la edad de 150,000 años para los domos, basado en termo-luminiscencia.

#### **3.3.2 Geología Local Superficial**

La siguiente información fue tomada de SKM (2008), y hace referencia a DAL (1995), más mapeo superficial realizado en 2008 por SKM<sup>4</sup> (ahora JACOBS) y Polaris Energy Nicaragua, S.A.

El Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate se divide en dos sectores: Sector Este (actualmente en explotación) y Sector Oeste (solamente explorado superficialmente).

El sistema geotermal del Sector Este yace en el valle entre el centro volcánico Telica, al Oeste, y el centro volcánico Rota, al Sureste, mientras que el prospecto Sector Oeste se encuentra en las faldas del complejo volcánico Telica-La Joya.

Las unidades predominantes son los productos volcánicos Telica, al Noreste, y los productos volcánicos Rota, al Suroeste. Incluido dentro del centro volcánico Telica, pero mapeado por

---

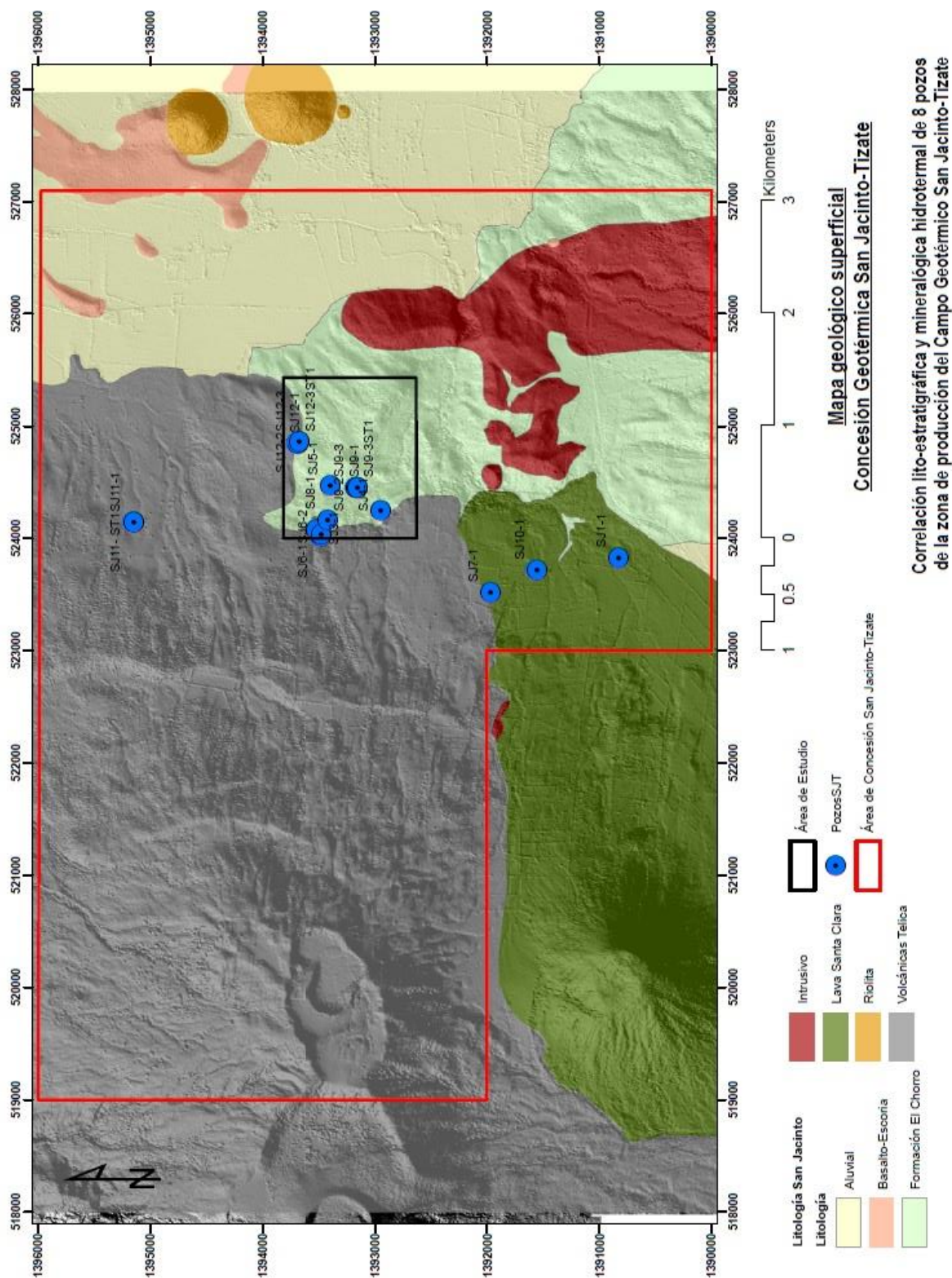
<sup>4</sup> SKM: Sinclair Knight Merz, consorcio consultor para Polaris Energy Nicaragua, S.A.

separado, están los productos volcánicos Santa Clara, los cuales son claramente evidentes cerca del cono Santa Clara y en el piso del valle San Jacinto. Estas tres unidades volcánicas consisten de una intercalación compleja de lavas, piroclastos y epiclastos típicos de estratovolcanes andesíticos. Estas rocas son predominantemente andesíticas, encontrándose ocasionalmente andesita basáltica y basalto. Estas unidades son de edad Cuaternario, pero hay insuficiente disponibilidad de datos para establecer relaciones entre ellas.

Una cuarta unidad, mucha más pequeña, de productos volcánicos andesíticos es encontrada en las colinas bajas al Este de los pozos de producción, y es referida como El Chorro-El Tizate. Localmente en esta área (inmediatamente al Sur de la pila conocida como “Pila de los sapos”) se encuentra un área de toba silíceo-pumítica. La pómez ocurre en un área muy delimitada (en el tope de una colina), lo cual sugiere es de un evento eruptivo de una fuente cercana. El área al Noreste de los centros volcánicos está comprendida por depósitos aluviales, incluyendo piroclastos redepositados.

Las unidades de formación encontradas en la superficie dentro del área de la concesión San Jacinto-Tizate son mostradas en la Figura 5.





Correlación lito-estratigráfica y mineralógica hidrotermal de 8 pozos de la zona de producción del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate

Figura 5: Mapa geológico superficial del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate (modificado de White, P. et al (2008)).

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS LITO-ESTRATIGRÁFICO**

### **4.1 LITO-ESTRATIGRAFÍA DEL CAMPO SAN JACINTO-TIZATE**

La sucesión geológica del Campo ha sido investigada hasta profundidades de 2300 m a través de las perforaciones realizadas desde 1994. Consiste mayormente de rocas ígneas, piroclásticas e intrusivos de composición básica a intermedia, y depósitos sedimentarios de origen volcánico primario. La edad de las rocas varía desde Mioceno tardío a Holoceno.

Cuatro unidades estratigráficas fueron identificadas, incluyendo unidades recientes piroclásticas-efusivas de los volcanes San Jacinto, Rota y Santa Clara, una unidad Pleistoceno tardío del volcán El Chorro-Tizate, sedimentos aluviales de la Depresión San Jacinto, y otras unidades encontradas solamente en los pozos más profundos (Spektor, 1994).

En el estudio de las primeras perforaciones realizadas por Intergeoterm<sup>5</sup> en 1994-1995 (pozos SJ1-1 a SJ7-1), Ostapenko *et al* (1998) subdividió la columna litológica del campo de la siguiente manera:

*Unidad 1: Edad Holoceno ( $Q_{IV}$ ):* La unidad es compuesta por depósitos volcánicos holocénicos. Incluye andesitas, basaltos y tobas de composición similar, así como sedimentos aluviales que rellenan la Depresión San Jacinto. Su espesor varía entre los 300 m en la zona del pozo SJ2, y unos 100 m en la zona de El Tizate (GeothermEx, 2001). La parte inferior de esta unidad se encuentra fuertemente alterada (zona argilítica).

*Unidad 2: Edad Pleistoceno ( $Q_{I-III}$ ):* Esta unidad está compuesta de lavas de composición andesítica y andesito-basáltica, con intercalaciones de tobas y escorias. Tiene un espesor variable entre los 400 m en la zona de San Jacinto y 300 m en la zona de El Tizate (GeothermEx, 2001). La parte superior de esta unidad se encuentra alterada (zona argilítica).

*Unidad 3: Edad Plioceno y Mioceno Temprano ( $N$ ):* Es una formación muy heterogénea, que presenta significativas variaciones de espesor y composición. En la zona meridional (pozos SJ1-1 y SJ2-1) se compone por secuencias monótonas de material volcánico retrabajado y caótico (brechas, conglomerados, bloques lávicos), con menores intercalaciones de lavas andesíticas o andesito-basálticas, mientras que en los pozos de El Tizate resulta

---

<sup>5</sup> Consorcio Estado (ENEL)-Burgazgeoterm, S.A. (sociedad rusa).



principalmente compuesta por espesas secuencias de lavas andesíticas masivas. El espesor varía alrededor de 500-600 m (GeothermEx, 2001).

*Unidad 4: Edad Mioceno tardío (N1):* Se presenta en toda el área a partir de 850-900 m de profundidad (GeothermEx, 2001), y se caracteriza por una secuencia volcano-clástica de lutitas y areniscas rojas, conglomerados y brechas, variadamente intercalada con productos volcánicos primarios (lavas y tobas). En la zona de El Tizate, debajo de los 1700 m abundan las lavas y, al fondo del pozo más profundo (SJ5-1) fueron encontradas areniscas finas grises, que pueden inclusive representar el tope de una unidad subyacente.

Al interior de la secuencia, en varios de los pozos y a diferentes profundidades, han sido reportadas también rocas subintrusivas, en forma de diques y pequeños cuerpos subvolcánicos (Ostapenko *et al*, 1998).

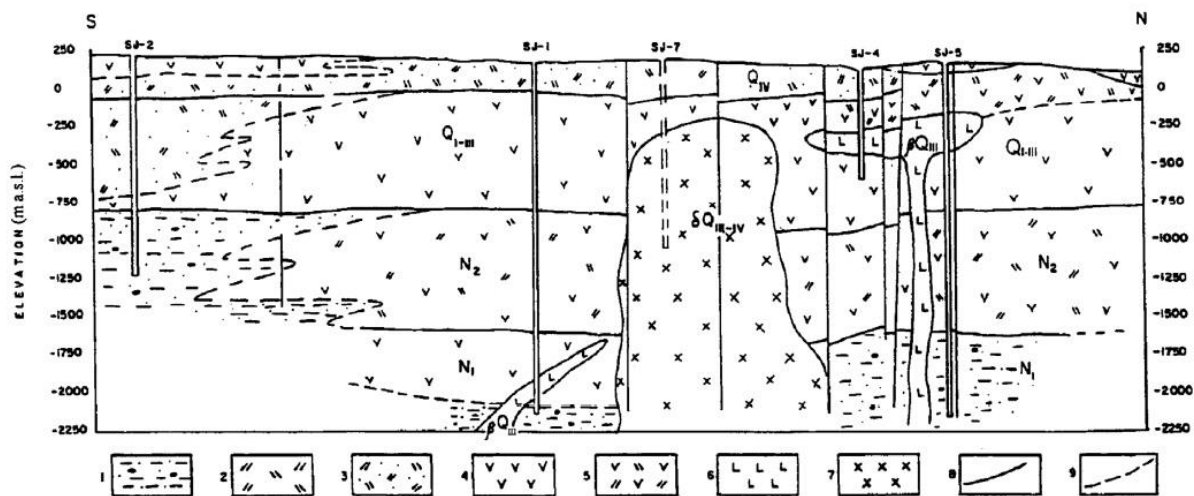


Figura 6: Sección transversal geológica Norte-Sur del campo San Jacinto-Tizate: 1. Rocas sedimentarias de origen volcánico; 2. Tobs; 3. Intercalaciones de toba y rocas sedimentarias; 4. Lavas andesíticas y andesito-basálticas; 5. Intercalaciones de lavas, tobas y rocas sedimentarias; 6. Cuello basáltico; 7. Intrusivo diorítico; 8. Contactos estratigráficos; 9. Contactos litológicos (Ostapenko *et al*, 1998).

## 4.2 UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

Utilizando las columnas litológicas de los pozos, se procedió a analizar el conjunto de datos y descripciones realizadas en la revisión macro y microscópica, con el fin de establecer una subdivisión del subsuelo del campo en unidades estratigráficas de acuerdo a la caracterización propuesta por Ostapenko *et al* (1998). A este fin se tomó en consideración las características de los productos volcánicos y los productos clásticos.

Las columnas litológicas de los pozos evidencian fuertes irregularidades en la distribución de las capas litológicas, sin embargo, se observaron importantes variaciones en sentido vertical, que permiten separar en las 4 unidades estratigráficas principales descritas previamente. Cabe destacar que puede faltar la unidad más profunda en alguno de los pozos implicados.

Para este estudio se analizaron 3 perfiles de correlación, uno en dirección Norte-Sur que comprende los pozos SJ12-2, SJ5-1 y SJ9-2, y dos en dirección Este-Oeste, comprendiendo los pozos SJ3-1, SJ5-1 y SJ12-3, y SJ6-1, SJ9-1 y SJ9-3F, los cuales cruzan la parte central o zona productiva del Campo (Figura 7). Las tablas a continuación (Tablas 4, 5 y 6) muestran la profundidad inicial y final, así como el espesor, por unidad de cada pozo para cada uno de los perfiles. Para efectos de correlación de los pozos direccionales, se transforma la Profundidad Desarrollada (MD) a Profundidad Vertical Total (TVD) por medio de un programa de cálculo propio de la empresa Polaris Energy Nicaragua, S.A.

Unidades	SJ12-2			SJ5-1			SJ9-2		
	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)
	Desde	Hasta		Desde	Hasta		Desde	Hasta	
I	202	117	85	167	52	115	161	71	90
II	117	-310	427	52	-518	570	71	-232	303
III	-310	-712	402	-518	-1198	680	-232	-1203	971
IV	-712	-2011	1299	-1198	-2172	974	-232	-1203	971

Tabla 4: Unidades lito-estratigráficas de los pozos del Perfil Noreste-Suroeste.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Elevaciones en negativo indican profundidad en relación al nivel medio del mar.

Unidades	SJ3-1			SJ5-1			SJ12-3		
	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)
	Desde	Hasta		Desde	Hasta		Desde	Hasta	
I	186	81	105	167	52	115	202	108	94
II	81	-469	550	52	-518	570	108	-539	647
III	-469	-1685	1216	-518	-2172	1654	-539	-2102	1563

Tabla 5: Unidades lito-estratigráficas de los pozos del Perfil Este-Oeste

Unidades	SJ6-1			SJ9-1			SJ9-3F		
	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)
	Desde	Hasta		Desde	Hasta		Desde	Hasta	
I	174	44	130	161	41	120	161	42	119
II	44	-411	455	41	-235	276	42	-214	256
III	-411	-1707	1296	-235	-1039	804	-214	-1743	1529

Tabla 6: Unidades lito-estratigráficas de los pozos del Perfil Noroeste-Sureste

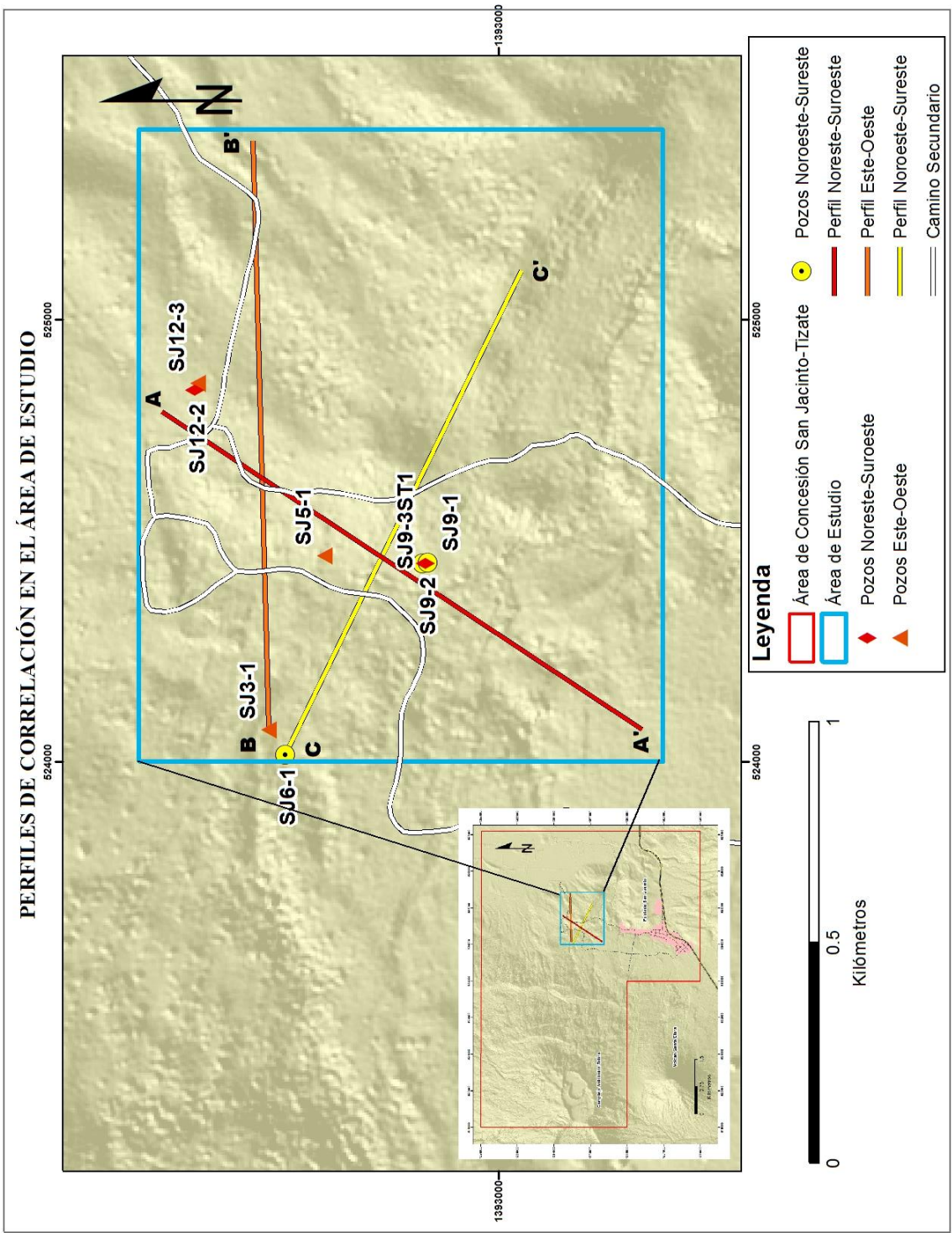


Figura 7: Ubicación de los perfiles de correlación dentro del área de estudio.

#### 4.2.1 Perfil Noreste-Suroeste (A-A')

Comprende los pozos SJ12-2, SJ5-1 y SJ9-2, y se extiende por una longitud aproximada de 1.3 km (Figura 8).

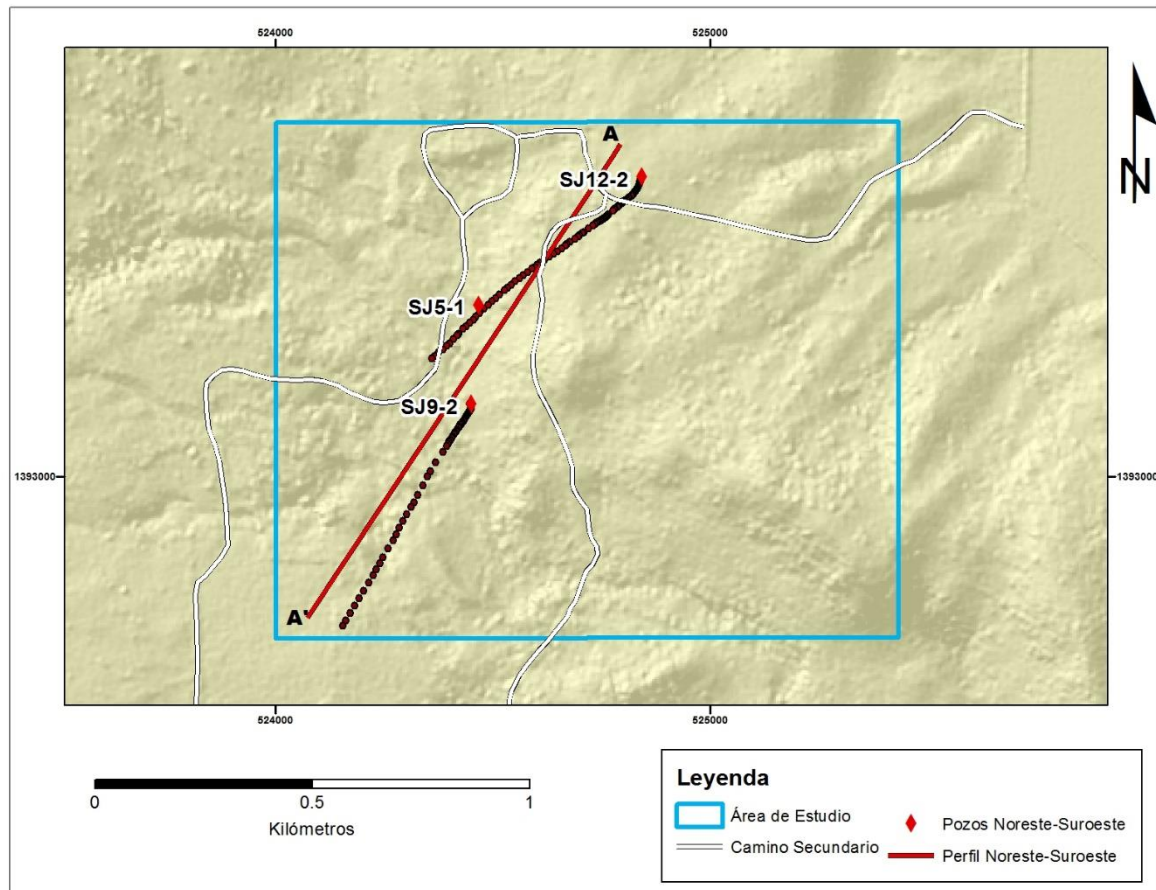


Figura 8: Perfil de correlación 1: Noreste-Suroeste (A-A')

### **Pozo SJ 12-2**

El pozo SJ12-2 se ajusta a la subdivisión estratigráfica presentada por Ostapenko *et al* (1998), a como sigue:

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): 202 – 117 *msnm*.

Compuesta por un nivel de pómez de 18 m de espesor, fuertemente alterada a arcilla y vesiculada, y un paquete lávico andesítico moderadamente alterado de 52 m de espesor. La parte inferior de esta unidad está fuertemente oxidada. Espesor: 85 m.

Unidad 2 (Tobas, lavas y escorias intercaladas): 117 – -310 *msnm*.

Consiste de intercalaciones entre tobas líticas, litocristalinas y lavas andesíticas, con un espesor de 427 m. La parte superior se encuentra intensamente alterada y mientras se profundiza la alteración disminuye.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): -310 – -2011 *msnm*.

Unidad heterogénea donde abundan los paquetes de tobas con intercalaciones de lava. Se presentan tobas de composición litocristalina, seguidas por las cristalolíticas, con alteración que varía de moderada a total. Las lavas, predominantemente de composición andesítica, se hallan moderadamente alteradas, rojizas debido a alteración por óxidos de hierro.

Además, se presenta una intercalación de paquetes tobáceos de composición predominantemente litocristalina, con espesores que varían entre 25 a 160 m, y paquetes lávicos de grandes potencias que se extienden a profundidad, variando entre 10 a 260 m. Las tobas se presentan de fuerte a intensamente alteradas, mientras que las lavas de fuerte a totalmente alteradas. A profundidad, ambos paquetes se hallan totalmente alterados, con alto porcentaje de minerales secundarios sustituyendo cristales, matriz y como relleno de venas, epidota principalmente. El espesor aproximado de esta unidad es de 1701 m.



## **Pozo SJ 5-1**

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): 167 – 52 *msnm*.

Esta unidad se compone mayormente de productos piroclásticos y depósitos retrabajados, rocas volcánicas de composición andesito-basáltica alteradas débilmente. En los primeros metros encontramos productos volcanoclásticos recientes, comprendiéndose de piroclastos vesiculados, fragmentos tobáceos cristalinos y andesita porfirítica. Estos productos se caracterizan por presentarse brechados y con alteración a arcilla.

En los siguientes metros de profundidad, predominan las intercalaciones entre toba litocristalina, andesita y andesita-basáltica. Las tobas se presentan en capas continuas y espesas, siendo la más somera cristalina. El siguiente paquete de toba tiene una matriz andesítica.

Las lavas son predominantemente andesíticas, y se componen de fragmentos que contienen plagioclasas, piroxenos, y escasos olivinos en una matriz fina. Algunos fragmentos de andesita incluyen cristales gruesos de piroxenos y plagioclasas en hábito tabular, con olivino de menor tamaño intercrecido con piroxeno. En el paquete más superficial se encontró andesita alterando a limonita o arcilla y fragmentos de cuarzo botroidal y residual. Fue evidente también hallar alteración por óxido de hierro en todos los niveles lávicos de esta unidad.

Unidad 2 (Tobas, lavas y escorias intercaladas): 52 – -518 *msnm*.

Esta unidad se compone de intercalaciones de lavas de composición andesítica a andesítica basáltica y tobas mayoritariamente litocristaloclásticas a cristalolíticas y depósitos de escoria fuertemente alterados. Se distingue el predominio de plagioclasas y piroxenos como minerales primarios, en matriz que va desde grano fino hasta arcillosa, debido a la alteración de plagioclasas en ella.

La intensidad de la alteración en las lavas es variable. Mientras en unos niveles se presentan lavas frescas, con cristales de plagioclasa y piroxeno (en algunos, olivino) levemente alterados, en otros niveles manifiestan alteración intensa.

Las tobas varían en intensidad de alteración de moderada a fuerte. En los primeros niveles de la unidad se encuentran tobas litocristalinas con alta cantidad de líticos (siendo estos en su mayoría andesíticos), con plagioclasas regularmente en hábito tabular a bloques subhedrales a euhedrales, y muy pocos piroxenos en una matriz fina alterada a arcilla, clorita, calcita y cuarzo. Los líticos presentes en las tobas se encuentran por lo general oxidados y vesiculares. En niveles intermedios se encuentran mezcladas entre toba litocristalina-toba cristalina-Andesita. Los depósitos de escoria se presentan oxidados, con vesículas rellenas parcialmente por minerales secundarios.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): -518 – -2172 *msnm*.

Predominan las tobas sobre las lavas, manteniéndose intercaladas en toda la unidad, y con significantes variaciones en el grado de alteración.

Las tobas varían de litocristalinas a líticas dominante. Los líticos se presentan subredondeados y clasificados como andesitas porfiríticas, así como también los cristales presentes son mayoritariamente plagioclasas anhedrales a subhedrales, y muy pocos máficos de tipo piroxénicos, en una matriz silicificada oxidada. Muchos de los paquetes tobáceos se encuentran mezclados con fragmentos andesíticos, por eso la mayoría se clasifica como Toba litocristalina.

En cambio, las lavas de esta unidad se caracterizan por una variación en la intensidad de alteración. Un ejemplo de esto es que se encuentran lavas de composición andesítica basáltica donde los cristales de plagioclasa están parcialmente alterados, los cristales de piroxenos con alteración moderada y los cristales de olivino se preservan y son reconocibles a diferentes profundidades, comprendidos en una matriz fina generalmente alterada.

Algunos niveles se clasifican como Andesita brechada, donde la mayoría de fragmentos tienen vesículas rellenas parcial a totalmente por minerales de alteración.

Además, esta unidad incluye grandes paquetes de lava andesítica intercaladas con paquetes medianos de tobas litocristalinas a lítico dominantes. La alteración se presenta de Intensa a Total. Uno de los minerales característicos de esta unidad es la hematita, ya que su presencia



y aumento en el grado de alteración se vuelve intenso, dando una coloración rojiza a andesitas y tobas retrabajadas.

Las lavas se comportan de manera alterna, variando entre niveles muy oxidados y niveles frescos. Se encuentran pocos cristales de olivino preservados, aun donde la intensidad de alteración es fuerte, predominando la oxidación y la silicificación.

## **Pozo SJ 9-2**

Este pozo es una perforación de tipo direccional, con 3 sidetracks, pero para este estudio se analizó solamente el agujero original. Se propone la subdivisión estratigráfica basada en Ostapenko *et al* (1998) de la siguiente manera:

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): *161 – 71 msnm.*

Esta unidad se compone mayormente de productos piroclásticos y depósitos retrabajados, rocas volcánicas de composición andesito-basáltica alteradas débilmente. En los primeros metros encontramos productos volcanoclásticos recientes, comprendiéndose de piroclastos vesiculados, fragmentos tobáceos alterados y andesita porfirítica. Estos productos se caracterizan por el alto contenido de óxido de Hierro y vidrio volcánico, y alteración intensa a arcilla.

En los siguientes metros predominan las intercalaciones entre toba cristalina y andesita basáltica. Las tobas se presentan en capas alternadas, en niveles gruesos y delgados, siendo éstas tobas cristalinas con comportamiento de toba cristalolítica en los primeros niveles (con algunos líticos lávicos oxidados).

Las lavas se componen de fragmentos que contienen plagioclasas, piroxenos, olivinos y algunos anfíboles en una matriz fina. La alteración hidrotermal varía de débil a moderada.

Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas): 71 – -232 *msnm*.

Esta unidad se compone de intercalaciones de andesita y tobas mayoritariamente cristalolíticas. Las lavas se presentan ocasionalmente con alteración intensa. Se distingue el predominio de plagioclasas y piroxenos como minerales primarios englobados en matriz de grano fino alterada a arcilla.

Las tobas varían en intensidad de alteración de débil a moderada, en dependencia de la profundidad. En los primeros niveles de la unidad se encuentran tobas cristalinas con poca cantidad de líticos (siendo estos en su mayoría andesíticos), con plagioclasas regularmente en forma de bloques euhedrales, y muy pocos piroxenos en una matriz fina cristalina.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): -232 – -1203 *msnm*.

Predominan las tobas sobre las lavas, manteniéndose intercaladas desde los -232 *msnm* hasta el fondo del pozo, y con significantes variaciones en el grado de alteración y espesores, siendo estos últimos medianos en la parte inicial de esta unidad, convirtiéndose en paquetes gruesos a medida que se acrecienta la profundidad.

Las tobas varían de cristalinas a líticas dominante, con varias combinaciones de litocristalinas a cristalolíticas. Las que incluyen líticos en su contenido los presentan subredondeados y clasificados como andesitas porfiríticas, así como también los cristales presentes son mayoritariamente plagioclasas anhedrales a subhedrales, y muy pocos máficos piroxénicos.

Muchos de los paquetes tobáceos se encuentran mezclados con fragmentos andesíticos, por eso la mayoría se clasifica como toba cristalolítica. La denominada Toba cristalina, presente en varias profundidades de la unidad, es heterogénea en composición. En niveles superiores se halla como una toba blanca con alto contenido de pirita en su matriz, y en los niveles inferiores mezclada con escasos líticos y fragmentos de toba cristalolítica, lo que le da un color rosáceo y a veces tiende a clasificarse como toba cristalolítica.

En cambio, las lavas de esta unidad, generalmente de composición andesítica, se caracterizan por un aumento de la alteración donde surgen asociaciones mineralógicas correspondientes

a temperaturas altas de formación. Estas lavas están compuestas de plagioclasas y piroxenos que se encuentran moderadamente alteradas. La matriz, de grano fino, generalmente se encuentra alterada, incrementando su intensidad respecto a la profundidad.

#### 4.2.2 Perfil Este-Oeste (B-B')

Comprende los pozos SJ 3-1, SJ5-1<sup>7</sup> y SJ 12-3, y se extiende por una longitud aproximada de 1.3 km (Figura 9).

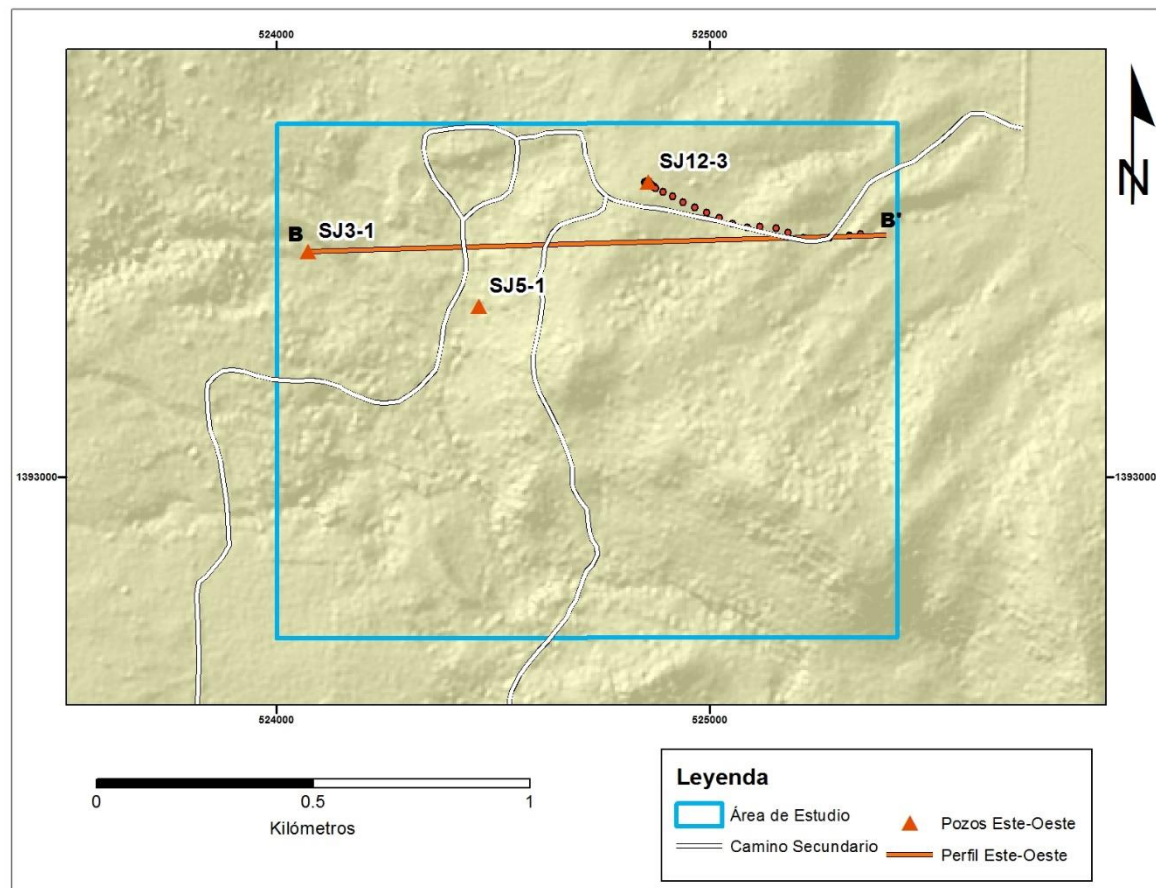


Figura 9. Perfil de correlación 2: Este-Oeste (B-B')

<sup>7</sup> Las unidades estratigráficas de este pozo ya fueron definidas en el acápite anterior.

### **Pozo SJ 3-1**

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): *186 – 81 msnm.*

Se compone principalmente por rocas volcánicas recientes, con lavas en el tope y base de la unidad, de composición andesítica y basáltica (debido a presencia de cristales de olivino), las cuales contienen fenocristales de plagioclasa, subordinados máficos y magnetita en una matriz de grano fino. Además, una pequeña capa de escoria vesicular alterada a minerales secundarios y arcilla, tres capas continuas de toba cristalina a líticas, las cuales se encuentran fuertemente alteradas a arcilla y calcita. La alteración es controlada estrictamente por la litología.

Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas): *81 – -469 msnm.*

Esta unidad se compone de paquetes lávicos de composición andesítica, un paquete de lava andesito basáltica, escoria y tobas que varían en su composición de cristalinas (siendo las más abundantes) a litocristalinas. Las lavas varían de afaníticas a porfiríticas, con cristales de plagioclasa y máficos en matriz de grano fino, generalmente con intensidad de alteración de moderada a intensa. En los primeros paquetes lávicos de la unidad se encuentran cristales de olivino, lo que representa una clasificación a andesito basáltica. Las tobas se presentan alteradas, de moderada a intensamente, predominando la toba cristalina alterada a arcilla, y en menor cantidad las litocristalinas a líticas, comprendiendo fragmentos líticos de origen andesítico, algunos vesiculados. El paquete de escoria se halla fuertemente alterado y con vesículas rellenas por minerales secundarios. El paquete de andesito basáltica se encuentra levemente alterado, evidenciando pocos cristales de plagioclasa, y abundantes cristales máficos (olivinos y piroxenos). El espesor de esta unidad es de 550 m.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): *-469 – -1685 msnm.*

Consiste en paquetes predominantemente lávicos de composición andesítica, intercalados con paquetes de toba que varían en composición, de lítica a cristalolítica. Las andesitas se presentan en gruesas capas, frescas a alteradas (mayormente a óxidos de hierro), algunas brechadas y mezcladas con fragmentos de toba. La mayoría de lavas contienen feldespatos plagioclásicos tabulares y moderados máficos en matriz de grano fino, conteniendo venas rellenas por minerales secundarios.

A los -674 msnm se encuentra una capa de andesita basáltica de 10 metros de espesor, débilmente oxidada, con feldespatos y máficos en matriz de grano fino.

Las tobas se presentan en capas delgadas, la mayoría de ellas dominando la intensidad de alteración, siendo ésta de fuerte a intensa. Domina la alteración a arcilla, calcita y cuarzo. Los líticos retenidos en estas tobas se clasifican como andesíticos.

En esta unidad se denota como característica común y principal la constancia y aumento de intensidad de óxidos de hierro, convirtiendo la mayor parte de la litología en paquetes de coloración gris cafésoso a café rojizo. Se compone mayoritariamente de paquetes tobáceos, de los cuales los líticos dominantes sobresalen, ya que son los más propensos a oxidación; además, pequeños paquetes intermedios, cristalolíticos, litocristalinos, y una capa escoriácea, con minerales secundarios relleno de vesículas.

También se encuentran incluidas las lavas, mayoritariamente de composición andesítica, dispuestas en paquetes intermedios, y una capa que se extiende hasta el fondo del pozo, con una potencia ininterrumpida de 120 metros. Estas rocas se hallan alteradas de moderada a intensamente, con silicificación y oxidación evidentes.

### **Pozo SJ 12-3**

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): 202 – 108 msnm.

Compuesta principalmente por volcanoclásticos que contienen fragmentos de escoria, pómez con escasos feldespatos y piroxenos, de matriz fibrosa con oxidación producida por intemperismo; toba arcillosa hinchable y un paquete de lava andesítica de textura fanerítica a porfirítica con feldespatos tabulares y ocasionales piroxenos en matriz de grano fino, con moderada alteración y presentando hacia la base una textura vesicular, escoriácea.

Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas): 108 – -539 msnm.

Se compone predominantemente de intercalaciones de paquetes de lava andesítica y toba lítica, y en menor proporción intercalada con tobas cristalinas. Las capas de toba lítica se

encuentran desde pocos metros de espesor (3 metros) hasta 95 metros (en el tope de la unidad). Los líticos contenidos son predominantemente andesíticos y escoriáceos con alteración a óxidos de hierro y arcillas, con venas finas a gruesas cortándolas y rellenas por minerales secundarios.

La toba cristalina se encuentra a partir de aproximadamente -261 msnm, intercalándose de igual manera en capas de lava andesítica de poco espesor. Estas tobas están compuestas de cristales de feldespatos alterados inmersos en una matriz alterada intensamente. Los paquetes de lava, que se presentan en espesores que van desde muy delgados (3 metros) hasta un paquete grande de 143 metros encontrado subyacente a la toba lítica en que empieza la unidad. La textura de estas lavas es de porfirítica a fanerítica, a veces amigdular, compuesto de fenocristales de plagioclasa y piroxenos, con alteración que va de moderada a intensa. Abundan las venas rellenas por minerales secundarios.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): -539 – -2102 *msnm*.

Unidad compuesta principalmente por intercalaciones de toba litocristalina a lítica y subordinada cristalina, y paquetes medianos de lava andesítica. En las tobas, los líticos son de composición andesítica con textura porfirítica a afanítica, los cristales plagioclasas tabulares, y la matriz, fina, con grado de alteración moderada a intensa, y con venas rellenas por minerales secundarios. En algunas tobas la alteración es total.

Las lavas son andesíticas, de textura afanítica a porfirítica, con feldespatos tabulares, piroxenos y en ocasiones magnetita, englobados en una matriz microlítica fina en la que predomina la alteración a óxidos de hierro y la presencia de venas rellenas por minerales de alteración.

Además, es representada por la predominancia de capas medianas de toba litocristalina intercaladas con capas delgadas de toba cristalina, y paquetes finos de lava andesítica, la cual después de los -1663 msnm se presenta intercalada en paquetes medianos a gruesos (entre 25 a 92 m de espesor). Además, finas capas de toba arcillosa y un paquete de aproximadamente 33 m de potencia de diorita + andesita, a los -1755 msnm, presumiblemente parte del intrusivo localizado al Este del Campo.

#### 4.2.3 Perfil Noroeste-Sureste (C-C')

Comprende los pozos SJ 6-1, SJ 9-1 y SJ 9-3F, y se extiende por una longitud aproximada de 1.2 km (Figura 10).

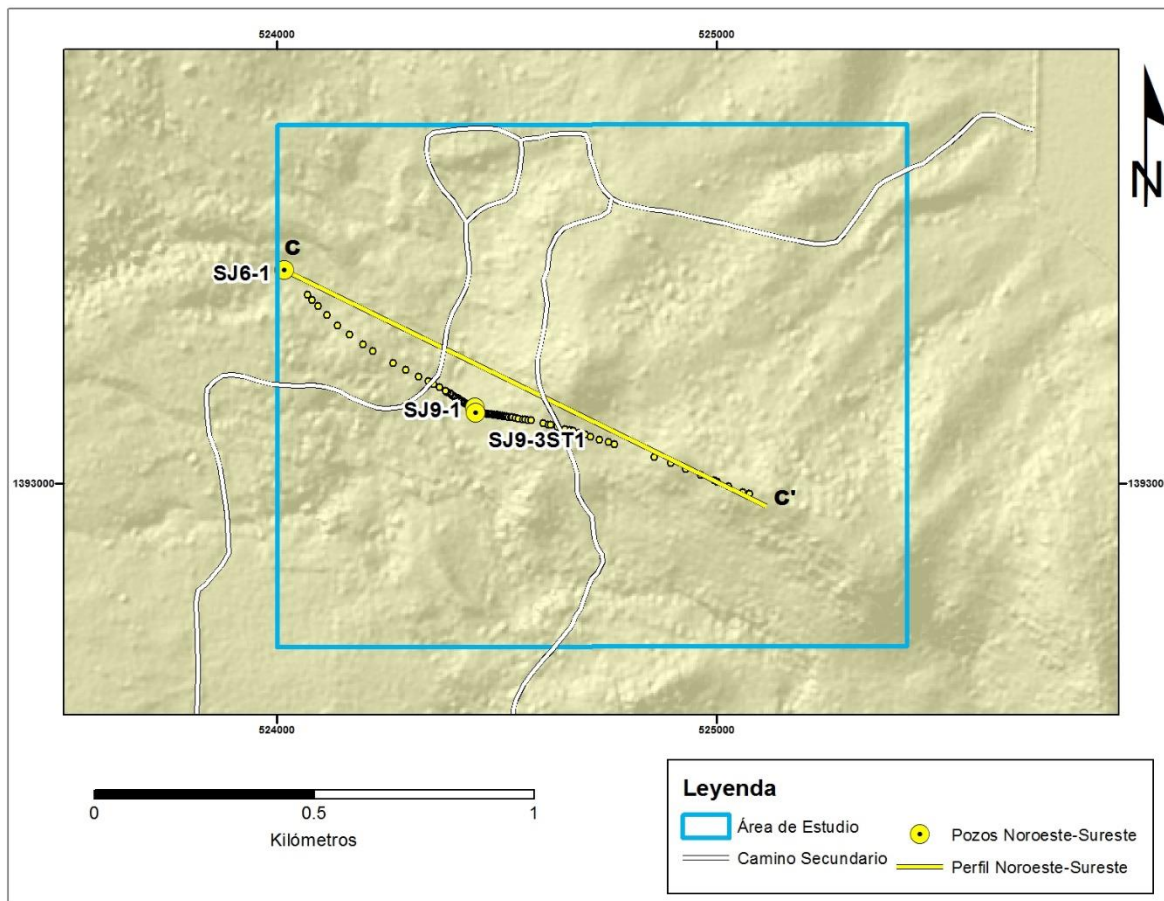


Figura 10: Perfil de correlación 3: Noroeste-Sureste (C-C')



### **Pozo SJ 6-1**

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): *174 – 44 msnm.*

Comprende rocas volcánicas recientes, representada por una andesita fresca entre los 5 y 25 metros, y una andesita basáltica entre los 74 y 44 msnm, la cual exhibe grado de alteración moderado a óxidos de hierro. Se incluye un paquete de tobas con espesor de 75 m con predominancia cristalina sobre cristalolítica, las cuales se presentan alteradas moderada a intensamente.

Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas): *44 – -411 msnm.*

Comprende lavas predominantemente de composición andesítica, con grado de alteración nulo a fuerte, y una muy delgada capa de lava andesita basáltica, las cuales se encuentran intercaladas con tobas mayoritariamente cristalinas que se muestran inalteradas a intensamente alteradas, en paquetes de potencias que van desde 5 a 50 metros. El grado de alteración en las tobas aumenta en los metros próximos a contacto con los paquetes andesíticos.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): *-411 – -1707 msnm.*

En este pozo, la primer parte de esta unidad es completamente lávica, comprendiendo andesitas con alteración leve a moderada, desde su tope hasta los -626 msnm, donde se mantiene mayoritariamente afanítica, mezclada con fragmentos de toba cristalina. De -626 msnm en adelante, cambia a “andesita alterada”, permaneciendo afanítica y aún mezclada con toba cristalina, con la diferencia de que la primera se encuentra silicificada, y la segunda argilizada. Contiene varias zonas de no recuperación de recortes, la mayor de 20 m.

Más a profundidad se presenta con una intercalación de lavas andesíticas de espesores grandes de entre 40 y 245 metros, y paquetes tobáceos predominantemente líticos, con potencias entre 5 y 80 metros, y varias zonas de no recuperación de muestra. Las lavas se hallan de moderada a intensamente alteradas, y las tobas con el mismo nivel de alteración pero incrementando ésta con la profundidad. Después de -1486 msnm no hubo recuperación de muestras, por lo que se asume que continúa la unidad hasta el fondo de este pozo.

### **Pozo SJ 9-1**

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): *161 – 41 msnm.*

Esta unidad se compone mayormente de volcanoclásticos y depósitos retrabajados, y rocas volcánicas de composición andesítica, alteradas débilmente. En los primeros metros (18 a 36 m) encontramos productos volcanoclásticos recientes, entre ellos piroclastos vesiculados, fragmentos tobáceos cristalinos y líticos, y andesita porfirítica vesiculada. Este paquete se caracteriza por estar intensamente alterado.

De 125 a 41 msnm predominan las intercalaciones entre tobas cristalinas a cristalolíticas, con menor andesita porfirítica. Las tobas se presentan en capas continuas y potencias entre 6 y 36 m, siendo las más abundantes las de composición cristalina, con alto contenido de arcilla y mayoría de niveles con indicios de brechación, así como matriz, vesículas y espacios intersticiales alterados por minerales secundarios. Algunas se hallan oxidadas y soportando en su matriz líticos andesíticos.

El único paquete de lava de la unidad es andesítico, con un espesor de 9 m, y comprende fenocristales de plagioclasa y menor cantidad de piroxenos en una matriz de grano fino.

Unidad 2 (Tobas, lavas y escorias intercaladas): *41 – -235 msnm.*

Compuesta por intercalaciones de lavas de composición andesítica y tobas mayoritariamente cristalolíticas a líticas. Las lavas se encuentran de moderada a fuertemente alteradas, con pocos niveles con alteración intensa. Éstas se presentan porfiríticas, conteniendo abundantes fenocristales finos a medios de plagioclasa, y menor cantidad de piroxenos en una matriz vítrea de grano fino. Algunos niveles tienen indicios de brechación con matriz cálcica, y otros se hallan con matriz alterada a ceolitas.

Las tobas, predominantemente líticas, se hallan con alteración fuerte a intensa. Contienen finos cristales de plagioclasa y piroxenos en matriz de grano fino, con líticos andesíticos subangulosos a subredondeados. Algunos paquetes presentan brechación con matriz de calcita y/o ceolita. Los espesores van de 3 a 36 m.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): *-235 – -1039 msnm.*

En esta unidad predominan los paquetes lávicos de composición andesítica, variando con intensidad de alteración de moderada a intensa. Se presentan con textura porfirítica, comprendiendo fenocristales de plagioclasa y piroxenos en matriz de grano fino. Algunos niveles presentan brechación con clastos subangulares cementados por matriz de calcita, cuarzo y/o ceolita. Además, se hallan intercalaciones de tobas, predominantemente cristalinas a litocristalinas, la mayoría de ellas con alteración intensa a total. La mayoría de paquetes con líticos andesíticos contienen vesículas y espacios intersticiales rellenos por minerales secundarios, así como fenocristales y matriz reemplazados. Los espesores son variables: las lavas, de 3 a 48 m; y las tobas, de 3 a 27 m.

### **Pozo SJ 9-3F**

Para el análisis estratigráfico de este pozo se tomó en cuenta la litología de los primeros 700 m de la perforación original, y consiguientemente, el forkleg.

Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes): *161 – 42 msnm.*

Compuesta predominantemente por tobas cristalinas, con una delgada intercalación de lava andesítica. Primeros niveles de toba litocristalina con alteración intensa a arcilla. Demás niveles con alteración fuerte e indicadores de flujo hidrotermal.

Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas): *42 – -214 msnm.*

Intercalación de tobas cristalinas a líticas, predominantes sobre lavas andesíticas alteradas fuertemente. Las tobas se encuentran recrystalizadas, con matriz arcillosa-cenizosa cloritizada. Nivel superior de lava andesítica altamente alterado.

Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas): *-214 – -1743 msnm.*

Compuesta por intercalaciones de lavas andesíticas predominantes sobre tobas cristalinas y líticas fuertemente alteradas. Las lavas se presentan afaníticas a porfiríticas, con predominancia de andesitas escoriáceas y vesiculares. Las andesitas son de grano fino con cristales de plagioclasa subhedrales y subordinados piroxenos en forma de bloques. Delgadas capas de toba cristalina gris verdosa de grano fino se encuentran intercaladas con la lava.

Además, se caracteriza por una secuencia volcanoclástica de tobas líticas y cristalinas. Las tobas líticas comprenden líticos de composición andesítica porfirítica, escoria y andesita basáltica. Las tobas cristalinas están compuestas mayormente de cristales de plagioclasa. Esta secuencia es variable, en rangos que van desde pocos metros hasta aproximadamente 100 m. A partir de los -1389 msnm una gruesa capa de andesita porfirítica fuertemente oxidada es encontrada hasta los -1610 msnm, seguida por intercalaciones de delgadas capas de toba con capas de lava andesítica.

## **CAPÍTULO V: ANÁLISIS MINERALÓGICO**

### **5.1 MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN EN LOS POZOS DEL CAMPO SAN JACINTO-TIZATE.**

#### **5.1.1 Mineralogía primaria**

La litología de San Jacinto Tizate está compuesta generalmente de material retrabajado y piroclastos consolidados que son dominantes en los niveles superficiales del campo, suprayacentes a una secuencia igualmente volcánica cuya composición litológica está representada por andesita, andesita basáltica, tobas (líticas, litocristalinas, cristalolíticas y cristalinas) e intrusiones de diques dioríticos. Los minerales primarios encontrados en el área son aquellos normalmente contenidos en rocas intermedias, los cuales, generalmente, son inestables en ambientes geotermales y presentan una tendencia a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables, o al menos metaestables, bajo las nuevas condiciones (Browne, 1984; Tabla 3). El grado de texturas primarias está en función de la permeabilidad de la formación y el tipo, abundancia y tamaño de grano de los minerales primarios. La alteración de éstos minerales ocurre con similitud en la mayoría de campos geotérmicos, pero algunos son específicos de algunos campos.

#### **5.1.2 Mineralogía de alteración**

En el campo geotérmico San Jacinto Tizate, los minerales de alteración hidrotermal aparecen tanto como reemplazo de minerales primarios, como relleno de vesículas, oquedades y fracturas. La definición de zonas hidrotermales fue obtenida de los análisis petrográficos y de Difracción de Rayos X (algunos realizados previamente) de los recortes de perforación tomados cada 3 metros (en algunos pozos, cada 5 metros).

Los principales minerales hidrotermales encontrados en el campo San Jacinto Tizate son calcita, cuarzo, clorita verde (clinochloro), clorita azul (pennina), calcedonia, epidota, esmectita, illita, mordenita, adularia, óxidos de hierro secundarios, sulfuros (pirita). Además, menores cantidades de anhidrita, laumontita, wairakita y prehnita están presentes. Las asociaciones minerales en las vesículas son comunes, y consisten de dos o más de los siguientes minerales: clorita, cuarzo, calcita, epidota y pirita, con una secuencia paragenética variable con la profundidad y de un pozo a otro.

A continuación se hace una pequeña referencia a algunos minerales (Tomado de Lagat, 2010):

• **Actinolita:**

Mineral de color verde a verde grisáceo, forma fibras radiadas o cristales aciculares, además de presentarse en agregados granulares masivos en matriz, y con moderada birrefringencia. Es formado en temperaturas mayores de a partir del reemplazo de minerales máficos y se encuentra asociado a epidota y clorita. Este mineral, del grupo de los anfíboles y con fórmula química  $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ , está asociado a temperaturas de formación de más de  $280^\circ\text{C}$  en campos geotérmicos (Reyes, 1998).

• **Adularia:**

Este mineral, de fórmula química  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ , forma cristales anhedrales a euhedrales diminutos, que son pseudo-ortorrómbicos y usualmente tienen forma de diamante. Ocurre como reemplazo de plagioclasa o de feldespatos potásicos y ocasionalmente se deposita en venas, indicando zonas de alta permeabilidad (Browne, 1978).

• **Anhidrita:**

Es un mineral compuesto de sulfato de calcio anhidro ( $\text{CaSO}_4$ ), la anhidrita se forma en pH mayores a 4, y  $T^\circ > 100-150^\circ\text{C}$ .

• **Calcita:**

Es un mineral de alteración ampliamente distribuido en la mayoría de niveles de los pozos en cuestión. Vesículas, fracturas y venas contienen depósitos de calcita cristalina. La calcita, de fórmula química  $\text{CaCO}_3$ , se encuentra comúnmente reemplazando fenocristales de plagioclasa y piroxeno.

• **Clorita:**

Son minerales que cristalizan en el sistema monoclinico y que se encuentran en forma de láminas flexibles de color verde. Se forman por transformación y alteración de la augita, la biotita y la hornblenda. Coexistiendo con el grupo de la illita en ambientes cuyo pH es 5-6.

El mineral representativo e identificable de este grupo es el clinocloro (clorita verde, de fórmula química  $(\text{Mg,Fe}^{2+})_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ).

• **Cuarzo:**

Mineral incoloro a blanco que se presenta en cristales euhedrales a subhedrales, relleno de vesículas (espacios abiertos) y venas. Es común encontrarlo en un amplio rango de temperaturas formando las variables enunciadas a continuación, de menor a mayor temperatura: sílice amorfa, tridimita, cristobalita y calcedonia. Su fórmula química es  $\text{SiO}_2$ .

• **Epidota:**

La epidota es un mineral sorosilicatado de calcio, aluminio y hierro, cristaliza en el sistema monoclinico. La epidota se presenta como granos incipientes pobremente cristalinos alrededor de 180-200°C y como fases bien cristalizadas a temperaturas mayores (>220-250°C). Su fórmula química es  $\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$ .

• **Illita:**

La illita es un tipo de mineral de arcilla que no es hinchable y es la más estable de todos los minerales de arcilla. Se conoce también como hidromoscovita. Generalmente se forma en fluidos con un pH 4-6 y a temperatura de 200 – 250°C. Su fórmula química es  $(\text{K,H}_3\text{O})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})]$ .

• **Óxidos:**

Los minerales sulfuros tienden a alterarse fácilmente (meteorización), siendo susceptibles a la oxidación y reemplazo de óxidos de hierro. Estos óxidos se forman generalmente en la superficie o cerca de ambiente superficial, donde el oxígeno de la atmósfera está presente.

• **Pennina:**

Es un mineral con fórmula química  $(\text{Mg,Fe,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{11}(\text{OH})_8$ , perteneciente al talco-clorito, cristaliza en forma de cristales aplanados de color verde azulado, tiene un sistema monoclinico.

• **Pirita:**

Se presenta como cristales cúbicos con brillo amarillo metálico en luz reflejada. Se encuentra comúnmente depositada en fracturas, vesículas y en venas, y diseminada en la matriz. Su fórmula química es  $\text{FeS}_2$ .

• **Prehnita:**

Generalmente ocurre como mineral de relleno de vena, principalmente en asociación con albita, epidota, clorita, calcita y cuarzo. Es reconocible en lámina delgada por su estructura de “corbatín”, clivaje en una dirección y birrefringencia fuerte. Su fórmula química es  $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ .

• **Wairakita:**

La wairakita es una zeolita de alta temperatura (200-300°C). Se presenta progresivamente en niveles más profundos y calientes del sistema hidrotermal, es un buen indicativo de permeabilidad. Su fórmula química es  $\text{Ca}(\text{Si}_4\text{Al}_2)\text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

### 5.1.3 Asociaciones mineralógicas

La paragénesis o asociación mineralógica que se desarrolla durante la alteración de las rocas refleja las condiciones de temperatura, presión, composición química de la roca originaria en el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio con el sistema hidrotermal.

Asociación mineralógica de equilibrio se refiere a un grupo de minerales aparentemente formado de la misma forma, faltando en este caso, evidencia de desequilibrio como el de sustitución por infiltración y retrometamorfismo.

Basado en las asociaciones mineralógicas de alteración hidrotermal en San Jacinto Tizate, se definieron tres zonas de alteración, las cuales se explicaron anteriormente, pero para efectos de utilización se detallan a continuación:

**Zona esmectita-zeolita:** Se caracteriza por la presencia de minerales arcillosos (esmectita, montmorillonita) sílice amorfa y zeolitas de baja temperatura, como estilbita, natrolita y



laumontita. Esta zona representa baja temperatura, en un rango entre 50 °C y 150 °C, donde domina el aporte de calor por conducción.

**Zona arcillas intercaladas-clorita-illita:** Aumenta la intercalación de arcillas illita - esmectita y clorita-esmectita y aparecen los de la fase de los filosilicatos, esencialmente clorita e illita. Además que aparecen en la parte más profunda de la zona. El rango de temperaturas de formación es entre 150 °C y 230 °C.

**Zona epidota-clorita-illita-wairakita:** Los minerales son epidota, albita, wairakita, adularia, clorita, cuarzo, pirita, calcita, illita, prehnita y óxidos de hierro subordinados, y en esporádicas apariciones, actinolita. La epidota es el mineral índice de mayor abundancia en esta zona. Disminuye la presencia de zeolitas de media temperatura y minerales arcillosos. El rango de temperaturas de formación es entre 230 °C y 260 °C.

## 5.2 ZONAS DE ALTERACIÓN MINERALÓGICA HIDROTHERMAL

La delimitación de las zonas de alteración se ha definido en base a la presencia, cantidad, hábito, relación y desarrollo de los minerales hidrotermales detectados en la revisión de los análisis macroscópicos y microscópicos previamente realizados a los recortes de perforación. Se consideraron también los resultados de las pruebas de difracción de rayos X y de azul de metileno realizadas en las etapas de perforación.

Las pruebas de azul de metileno fueron realizadas en el sitio durante la perforación de cada pozo, ayudando a la determinación semicuantitativa y en tiempo real de la capacidad de intercambio de iones de las muestras, la cual es ampliamente determinada por el contenido de arcilla esmectita en los recortes de perforación. La aplicación y metodología detallada del análisis para propósitos geotérmicos son presentadas en Gunderson *et al.* (2000).

Las pruebas de Difracción de Rayos X fueron propuestas por los geólogos de turno de cada pozo a diferentes profundidades, y realizadas por la Universidad de Utah, en California.

Para determinar el límite inferior aproximado de la capa sello del reservorio geotermal se tomó el valor previo al decrecimiento general de los índices de azul de metileno respecto a la profundidad, que es donde la proporción de arcilla esmectita decrece y se abre paso a la ocurrencia de illita-esmectita. La tabla mostrada a continuación presenta estos límites.

Pozo	Profundidad (m)	Profundidad (msnm)
SJ9-2	400	-239
SJ5-1	368	-200
SJ12-2	554	-352
SJ3-1	330	-144
SJ12-3	533	-331
SJ6-1	303	-129
SJ9-1	360	-199
SJ9-3F	424	-263

Tabla 7: Límites inferiores de la capa sello del reservorio del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate.

En base al análisis holístico de los resultados disponibles se han podido crear las tablas que se encuentran a continuación, donde se presenta la definición de la profundidad inicial y final de las zonas de alteración por pozo para cada uno de los perfiles, mostradas en profundidad TVD transformada de la profundidad MD con referencia al nivel medio del mar, así como el espesor de cada zona. Estos datos fueron de utilidad para realizar la correlación de zonas mineralógicas.

Zonas	Temperatura mineralógica (°C)	SJ12-2			SJ5-1			SJ9-2		
		Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)
		Desde	Hasta		Desde	Hasta		Desde	Hasta	
Esmectita-zeolita	50-150	202	-627	829	168	-792	960	161	-571	732
Arcillas intercaladas-clorita-illita	150-230	-627	-1088	461	-792	-1197	405	-571	-829	258
Epidota-clorita-illita-wairakita	>230	-1088	-2011	923	-1197	-2172	975	-829	-1203	374

Tabla 8: Zonas mineralógicas hidrotermales de los pozos del Perfil Noreste-Sureste.

Zonas	Temperatura mineralógica (°C)	SJ3-1			SJ5-1			SJ12-3		
		Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)
		Desde	Hasta		Desde	Hasta		Desde	Hasta	
Esmectita-zeolita	50-150	186	-614	800	168	-792	960	202	-347	547
Arcillas intercaladas-clorita-illita	150-230	-614	-1685	1071	-792	-1197	405	-347	-667	320
Epidota-clorita-illita-wairakita	>230				-1197	-2172	975	-667	-2102	1435

Tabla 9: Zonas mineralógicas hidrotermales de los pozos del Perfil Este-Oeste.

Zonas	Temperatura mineralógica (°C)	SJ6-1			SJ9-1			SJ9-3F		
		Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)	Profundidad (msnm)		Espesor (m)
		Desde	Hasta		Desde	Hasta		Desde	Hasta	
Esmectita-zeolita	50-150	174	-626	800	161	-1039	1200	161	-539	700
Arcillas intercaladas-clorita-illita	150-230	-626	-1226	600				-539	-1015	476
Epidota-clorita-illita-wairakita	>230	-1226	-1707	481				-1015	-1743	728

Tabla 10: Zonas mineralógicas hidrotermales de los pozos del Perfil Noroeste-Sureste.

A continuación se presenta la descripción mineralógica de cada pozo por perfil.

### **5.2.1 Perfil Noreste-Suroeste (A-A')**

Se incluyen los pozos SJ12-2, SJ5-1 y SJ9-2.

#### **Pozo SJ12-2**

Zona esmectita-zeolita: Se representa desde los 202 msnm hasta los -627 msnm. Los minerales indicadores de esta zona incluyen esmectita y los minerales arcillosos illita-esmectita y clorita-esmectita. Los minerales de relleno de vena en esta zona incluyen los arcillosos, zeolitas, cuarzo y anhidrita. Asimismo, se observó un cambio progresivo en las especies minerales del grupo de las zeolitas con respecto al aumento de la profundidad -según resultados de análisis de difracción de rayos X- de estilbita, chabazita, clinoptilolita, a finalmente trazas de laumontita. La calcita es muy abundante, típicamente formándose después o sobre cuarzo y minerales arcillosos, formando cristales en forma de bloque a anhedrales.

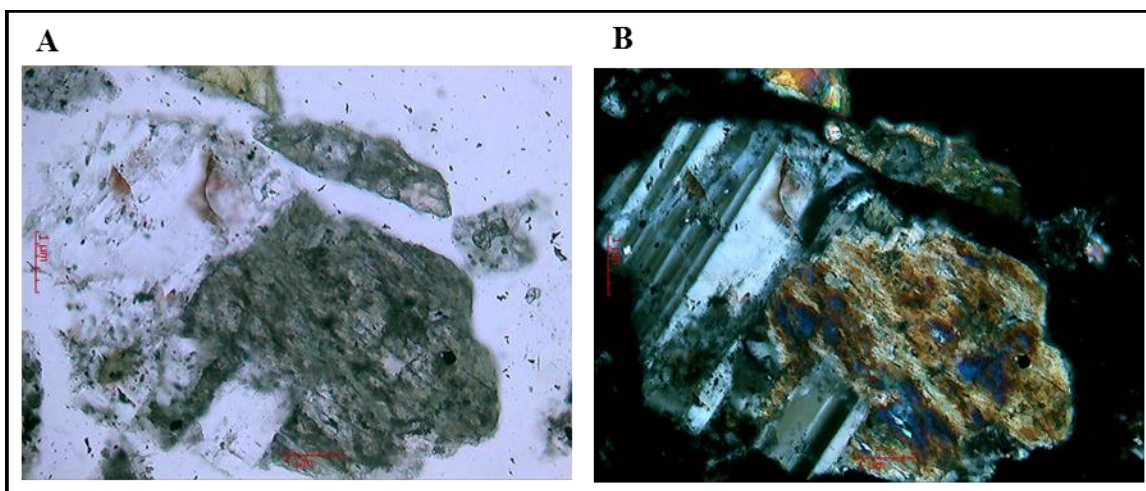
Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Esta zona es meramente transicional entre la zona dominada por arcillas y la zona de alta temperatura (zona de desarrollo de epidota). En este pozo se caracteriza por su contenido de illita, clorita, y epidota incipiente (en este caso, trazas). El rango de temperatura de esta zona es de 150° a 230°C. Basado en el contenido bajo de esmectita en los minerales arcillosos, esta zona inicia a los -627 msnm, donde el contenido de illita respecto a la esmectita se encuentra en una proporción de 90:10. Esta zona es diferenciada de la zona esmectita-zeolita por la ocurrencia de abundante cuarzo hidrotermal, como relleno de oquedades y de venas, en forma de cristales euhedrales y masas botroidales. La adularia varía en concentración entre ~10-30%<sup>8</sup> en andesitas alteradas, ocurriendo principalmente como reemplazo de fenocristales de plagioclasa y microlitos de plagioclasa en la matriz, y muy raramente como relleno de espacios intersticiales. El reemplazo de plagioclasa por laumontita es extensivo en las andesitas de -727 msnm y -865

---

<sup>8</sup> Porcentaje respecto al total mineral de la muestra.

msnm. La wairakita se hace evidente y abundante a medida que se acerca a la zona epidota-clorita-wairakita.

Zona epidota-clorita-illita-wairakita: Definida por la ocurrencia continua de epidota, la cual se presenta a partir de los -1088 msnm. Este es el principal mineral de relleno/alteración representativo de esta zona. Por otro lado, la adularia persiste, teniendo su proporción máxima a los -1693 msnm, con 34%. Venas de este mismo mineral son abundantes en las 4 muestras de láminas delgadas más profundas (-1547, -1693, -1834, -1980 msnm). Según Browne (1978), la adularia es común en zonas de alta permeabilidad. La wairakita es muy abundante en esta zona, principalmente en flujos de detritos y brechas hidrotermales, así como en una andesita brechada a los -1096 msnm, con 11%, en conjunto con laumontita. Se llegó a encontrar actinolita ( $T^{\circ} > 250^{\circ}\text{C}$ ) en tres muestras profundas (-1693, -1834 y -1980 msnm) (Figura 11).



*Figura 11: A) Nícoles paralelos, aumento 20X. Actinolita fibrosa subhedral desarrollada sobre un cristal subhedral de plagioclasa en muestra de -1980 msnm. Se observa un cristal de epidota en el borde superior.*

*B) Nícoles cruzados, aumento 20X.*

### **Pozo SJ5-1**

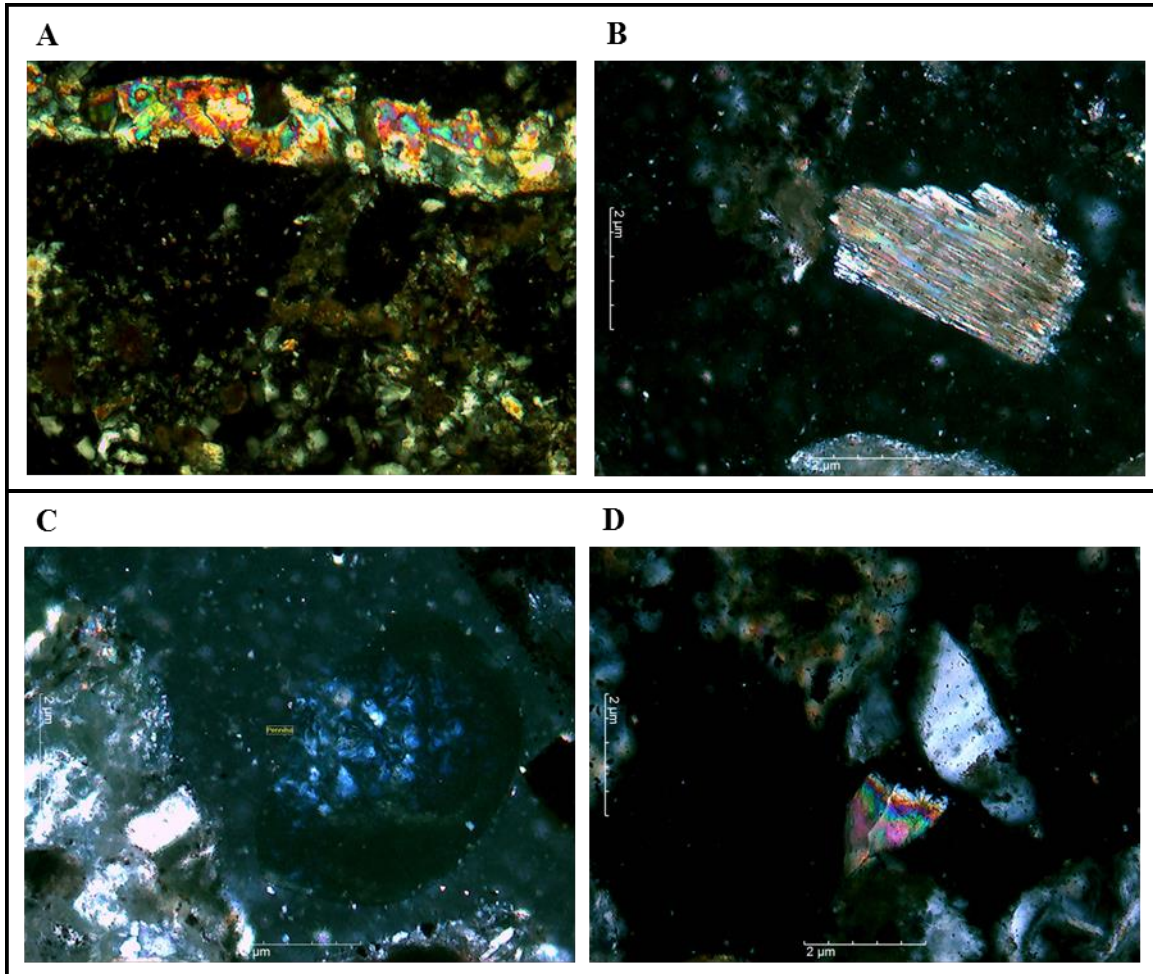
Zona esmectita-zeolita: Se representa desde los 168 hasta los -792 msnm. Predominan las arcillas de tipo esmectita y caolinita, alterando sobre plagioclasas y presentándose en la matriz, y en forma de venas y rellenando vesículas y espacios intersticiales. La clorita empieza a aparecer, y se da paso también a arcillas de tipo illita-esmectita y clorita-esmectita. Es común la presencia de calcita y cuarzo de tipo residual rellenando venas y vesículas, y como fragmentos individuales. Además, se puede encontrar clorita en menores cantidades. A los 38 y -97 msnm se encontraron pequeños cristales de anhidrita sobre cuarzo, lo cual podría indicar que el pozo está teniendo un proceso de recalentamiento, ya que la anhidrita, en sistemas geotermales, cristaliza por encima de los 150°C. Se da la aparición de zeolitas de tipo natrolita y mordenita, en forma de cúmulos o agregados y agujas. Igualmente, óxidos de hierro rellenando micro-vesículas. A medida que se profundiza, se encuentran cristales de plagioclasa y piroxeno parcial a totalmente alterados, identificables por la forma remanente del mineral.

Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Se extiende desde -792 msnm hasta -1197 msnm. Se caracteriza por el desarrollo y aparición de cloritas verdes (clinocloro) y azules (pennina), las cuales se hallan rellenando vesículas y espacios intersticiales, y alterando sobre máficos (piroxenos) y en matriz. Empieza a aparecer arcilla tipo illita, y se desarrolla clorita-illita. La mineralogía primaria se encuentra muy poco retenida, la alteración es de moderada a fuerte. En las muestras de -802 y -1032 msnm se encontraron pocos cristales de anhidrita y epidota incipiente, apenas apareciendo. Zeolita de tipo laumontita se encuentra en baja proporción (~2%). Opacos cúbicos (pirita) en proporción moderada de 12%. Se presentan también cuarzo y calcita subhedrales alterando sobre cristales de plagioclasa y en matriz, y rellenando venas y vesículas.

Zona epidota-clorita-illita-wairakita: Abarca desde -1197 hasta -2172 msnm. Se caracteriza por la formación y desarrollo de epidota como reemplazo de plagioclasa y calcita, y como mineral de vena, y la disminución de cloritas. La clorita verde (clinocloro) se encuentra escasa y corroída, y la clorita azul (pennina) en moderada cantidad. Se desarrolla óxido de hierro, principalmente en matriz y en bordes de metálicos (pirita y magnetita). Aparecen y se desarrollan adularia, epidota, anhidrita, prehnita, actinolita y wairakita. Se da un aumento de



illita, la cual se encuentra reemplazando plagioclasa. Por el contrario, se reduce el contenido de cuarzo, presentándose como mineral de relleno de vesículas y en matriz. Las ceolitas de tipo laumontita y wairakita rellenan espacios intersticiales. La calcita disminuye en abundancia a medida que se profundiza, y sobre ella se encuentra alterando ocasionalmente illita-sericita.



*Figura 12: A) Vena de epidota a los -1592 msnm. B) Cristal subhedral de actinolita fibrosa en lámina de -2092 msnm. C) Matriz alterada a pennina a los -2092 msnm. D) Cristales euhedrales de prehnita y adularia en -2092 msnm. Todas en nícoles cruzados y con aumento de 20X.*

## **Pozo SJ9-2**

Zona esmectita-zeolita: Es representada por arcilla tipo esmectita, clorita-esmectita e illita-esmectita, las cuales son acompañadas por zeolitas tipo heulandita-mordenita, cuarzo, pirita, óxido de hierro, calcita y clorita. De los 110 a 17msnm las vesículas son rellenas parcial o totalmente con arcillas verdes y blancas (clorita-esmectita y caolinita), calcita y/o cuarzo. A los -425 msnm la zeolita es de tipo laumontita y ocurre reemplazando plagioclasas, relleno vesículas, en la matriz de brechas y en venas. A los -529 msnm se da la primera aparición de prehnita, junto a una evidente aparición de clorita de tipo clinocloro.

Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Comienza desde los -571 hasta los -829 msnm. A los -571 msnm se evidencia que la arcilla illita-esmectita es reemplazada por illita. Además, se acierta en el reconocimiento de prehnita y calcedonia radiada. A los -829 msnm, la asociación clorita-esmectita desaparece y se desarrolla la clorita de tipo clinocloro. En este intervalo, los minerales de alteración son illita, zeolita (laumontita o wairakita), clorita, calcita, cuarzo, adularia (evidenciada a partir de los -802 msnm, reemplazando plagioclasas en la matriz) y epidota (observada incipiente a esa misma profundidad).

Zona epidota-clorita-illita-wairakita: Se evidencia con la aparición en proporción considerable de epidota (>1%), siendo la primera de ésta a los -829 msnm, de ahí en adelante es persistente. Además se hace evidente el desarrollo de adularia, clorita tipo pennina, illita, cuarzo, prehnita, wairakita, calcita y anhidrita (ésta última evidenciada en lámina delgada a los 1198 msnm).



### 5.2.2 Perfil Este-Oeste (B-B')

Se incluyen los pozos SJ3-1, SJ5-1<sup>9</sup> y SJ12-3.

#### Pozo SJ3-1

Zona esmectita-zeolita: Se representa desde los 181 msnm hasta aproximadamente -614 msnm. Los minerales correspondientes a esta zona en este pozo son los arcillosos (esmectita, illita-esmectita y clorita-esmectita), cuarzo y calcita, siendo éstos los más representativos. Entre los minerales de relleno de venas se incluyen calcita y cuarzo en las primeras profundidades, hasta llegar a encontrar depositación de zeolitas de baja temperatura. La calcita es muy abundante, típicamente depositándose sobre cuarzo y minerales arcillosos formando cristales anhedrales.

Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Se extiende desde aproximadamente los -614 msnm hasta el fondo del pozo (-1685 msnm). Los minerales propios de esta zona alcanzaron su desarrollo entre los -954 msnm y los -1289 msnm, donde la clorita se encontró en proporciones de 7 y 2%, respectivamente. A partir de ésta última profundidad se observó una deflexión en el contenido de arcilla illita y clorita ocasionada por una sustitución o invasión de óxidos férricos (hematita, principalmente) que alcanzaron su mayor proporción a los -1414 msnm con 49%, mientras la clorita se encontraba en 1%. A partir de los -1554 msnm decrece el contenido de óxidos de hierro e incrementa el de illita y clorita. La zeolita de tipo wairakita se encuentra presente en toda la zona, encontrándose más abundante a los -1554 msnm, con 6% respecto al contenido total de la muestra. El mineral calcita es ubicuo, con porcentaje no mayor de 10%. Se encontraron escasos en proporción minerales de alta temperatura como prehnita, la cual fue evidente a los -954 msnm, así como trazas de epidota a los -1289 msnm.

Se omite la zona de mayor temperatura, dado al escaso o nulo desarrollo de los minerales indicadores.

---

<sup>9</sup> Las zonas de alteración hidrotermal de este pozo ya fueron definidas en el acápite anterior.

### **Pozo SJ12-3**

Zona esmectita-zeolita: Se extiende desde la superficie hasta -347 msnm. Es representada por arcilla esmectita, calcita, óxidos de hierro, clorita, cuarzo y pirita. La alteración en la secuencia de lavas y tobas, desde 108 hasta -347 msnm, es generalmente fuerte a intensa. Se encuentran lavas con vesículas rellenas por cuarzo, calcita, arcilla o clorita. En esta zona es frecuente encontrar venas finas a medias, y ocasionalmente gruesas, conteniendo calcita, cuarzo, óxidos de hierro, clorita y pirita. En análisis de difracción de rayos X se encontró en menores cantidades calcedonia, siderita, estilbita y adularia.

Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Desde -347 msnm hasta -667 msnm. En esta zona es donde se desarrollan las arcillas illita-esmectita y clorita-esmectita, así como la clorita de tipo clinocloro reemplazando fenocristales y relleno de espacios intersticiales, y en venas asociada con calcita, óxidos de hierro, cuarzo y pirita. A partir de los -411 msnm aparece zeolita esporádica, como cristales en racimos, cristales individuales y en venas. El cuarzo es común reemplazando minerales primarios y también en venas, como cristales euhedrales en matriz y raramente calcedonia relleno de espacios intersticiales. Según los resultados del análisis de difracción de rayos X se identificó adularia, laumontita, dolomita, siderita, estilbita y calcedonia.

Zona epidota-clorita-illita-wairakita: La primera aparición intermitente de epidota ocurre entre -667 y -1754 msnm, y es observada continuamente desde -1810 msnm hasta el fondo del pozo. Se halla abundante, ocurriendo como cristales euhedrales individuales, reemplazando plagioclasas y en menor cantidad como relleno de venas. Otros minerales presentes son calcita, clorita, illita-esmectita, cuarzo, pirita, hematita y en menor cantidad zeolitas. En esta zona, la epidota coexiste con minerales arcillosos, lo cual no corresponde a una asociación en equilibrio. Se puede inferir que la epidota se formó durante una fase temprana de alteración de alta temperatura, y los minerales arcillosos son más representativos de condiciones actuales. Según resultados de difracción de rayos X efectuados en muestras a diferentes profundidades en esta zona, los minerales identificados son adularia, laumontita, wairakita, anhidrita, prehnita, titanita e illita.

### 5.2.3 Perfil Noroeste-Sureste (C-C')

Se incluyen los pozos SJ6-1, SJ9-1 y SJ9-3F.

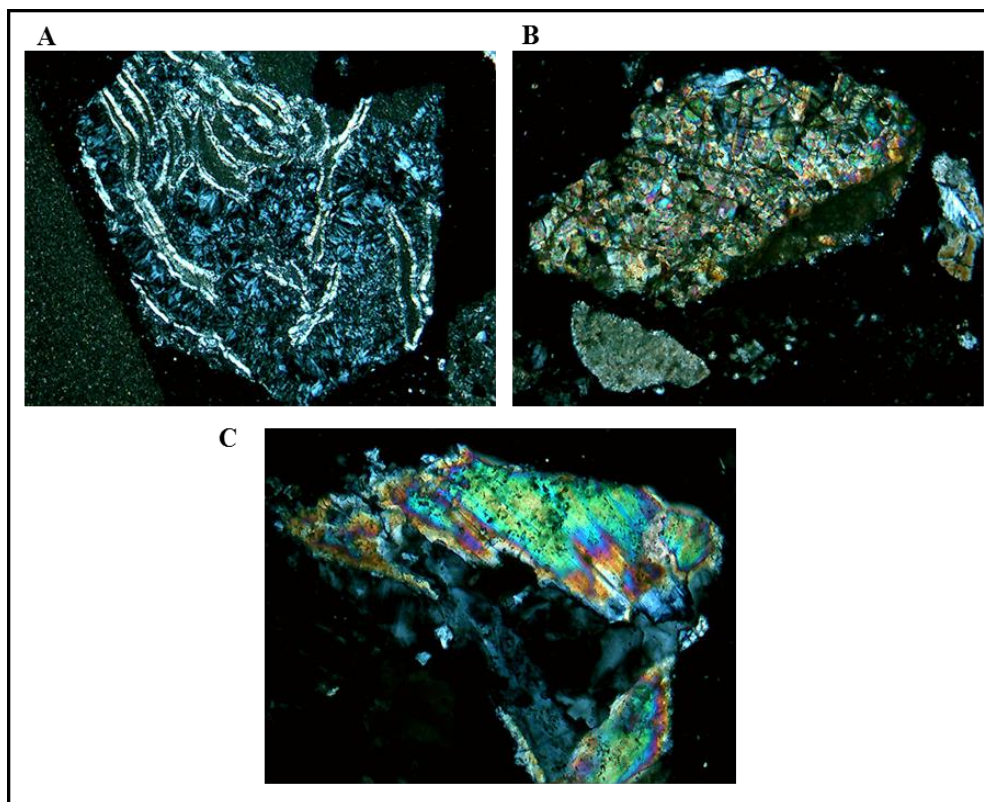
#### Pozo SJ6-1

Zona esmectita-zeolita: Representada desde los 174 msnm hasta los -626 msnm. Dentro de los minerales presentes en esta zona se incluyen esmectita y los minerales arcillosos illita-esmectita y clorita-esmectita. Los minerales de relleno de vena corresponden a cuarzo, esmectita, illita-esmectita, calcita, hematita e illita. En esta zona se observa un cambio progresivo de las arcillas, al pasar de esmectita en los primeros niveles, a illita-esmectita hasta alcanzar una relación 90:10 en la base de la zona. Igualmente se evidencia la transición de la clorita, al encontrarse intercalada con esmectita, para convertirse en clorita de tipo clinocloro en la siguiente zona. Por el contrario, se da un pobre crecimiento de zeolitas, al encontrarse solamente un agregado cristalino de natrolita a los 68 msnm. De manera similar se presenta la anhidrita, limitada a la escasa aparición sobre una plagioclasa alterada a calcita.

Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Se caracteriza por el desarrollo de la clorita y el paso de illita-esmectita a illita, y la aparición de epidota en trazas y otros minerales secundarios. En este pozo, el desarrollo de la clorita es moderado, apareciendo solamente de tipo clinocloro, y en menor proporción aun conjugada con esmectita. Aun así, basado en el contenido bajo de esmectita y la predominancia de illita en los minerales arcillosos, esta zona inicia a los -626 msnm, que es donde la intensidad de alteración del paquete de lava andesítica cambia bruscamente de moderada a fuerte-intensa. Se halla además cuarzo, calcita, illita y clorita rellenando venas y espacios intersticiales. Wairakita y erionita fueron identificados mediante difracción de rayos X.

Zona epidota-clorita-illita-wairakita: Definida por la ocurrencia continua de epidota, aunque en este pozo no se desarrolla de manera óptima. El inicio de esta zona está marcado a los -1226 msnm aproximadamente, que es donde la epidota comienza a incrementar en abundancia. Análogo, se evidencia el desarrollo de wairakita y hematita, acompañados de cuarzo, calcita, illita, y en menores cantidades, clorita. Se da la aparición incipiente de prehnita y anhidrita a los -1226 y -1381 msnm. Los rellenos de venas lo constituyen cuarzo

e illita, al igual que los espacios intersticiales. A los -1486 msnm ocurre un descenso en el contenido de epidota y wairakita, y un aumento de illita.



*Figura 13: A) Fragmento cloritizado con venas de illita-esmectita en lámina de 430 m (-256 msnm), aumento de 10X. B) Agregado cristalino de epidota subhedral en un fragmento alterado a cuarzo en muestra de 1555 m (-1381 msnm), aumento de 10X. C) Cristal de epidota euhedral desarrollado sobre wairakita a los 1555 m (-1381 msnm), aumento de 20X. Todas en nícoles cruzados.*

### **Pozo SJ9-1**

Zona esmectita-zeolita: La unidad superficial volcanoclástica es variablemente alterada a arcilla, calcita y óxidos de hierro hasta los 125 msnm. Debajo de esto, la alteración en lavas y tobas permanece fuerte a intensa y es caracterizada por una asociación de arcilla, calcita, pirita, clorita –esmectita, confirmado a los -109 msnm. Se identificó calcedonia a los -19 msnm.

La alteración continúa debajo de los -109 hasta los -572 msnm, donde la esmectita es apenas reemplazada por clorita-esmectita y luego por illita-esmectita. Laumontita ocurre como agujas reemplazando clinoptilolita o estilbita. Adularia ocurre desde los -289 msnm reemplazando cristales de plagioclasa. El mineral cuarzo se vuelve común reemplazando minerales primarios y en venas, fragmentos individuales y en matriz de brecha.

Epidota ocurre incipiente (<1%) a los -457 msnm. Calcita y arcillas, identificadas por difracción de rayos X, siguen abundantes, al igual que clorita tipo clinocloro, cuarzo y pirita. Anhidrita y prehnita también encontradas. Zeolita reemplazada por calcita.

Dada la inconsistencia en las asociaciones mineralógicas, no se definen zonas subsiguientes..

La zeolita tipo laumontita no es usualmente estable más allá de 220° C, mientras que la epidota ocurre a más de 240° C.

### **Pozo SJ9-3F**

Zona esmectita-zeolita: Representada desde los 161 msnm en superficie, hasta -539 msnm que es donde inicia el Forkleg. En esta zona se encuentra abundantemente la asociación típica hidrotermal: arcillas de tipo esmectita, zeolita de baja temperatura, cuarzo, calcita, arcilla illita-esmectita, adularia, hematita y titanita. Los minerales de venas incluyen zeolita, calcedonia, cuarzo y calcita. Las zeolitas, además reemplazan cristales de piroxeno, ocurriendo de manera fibrosa tabular, tentativamente identificada como estilbita, basado en sus características ópticas. La calcita es localmente abundante, depositándose después de cuarzo y calcedonia, formando cristales en forma de bloque a anhedrales, y a los -177 msnm se encuentra intercrecida con cuarzo. La calcedonia se presume sea por ebullición del fluido geotermal.

Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Extendiéndose desde los -539 msnm hasta -1015 msnm, donde la alteración es dominada por clorita (de tipo clinocloro confirmado en resultados de difracción de rayos X, y pennina por análisis petrográfico), calcita, cuarzo, hematita, pirita y laumontita (confirmada por resultados de DRX), y ocasionalmente prehnita y anhidrita mayoritariamente rellenando oquedades y reemplazando matriz y cristales. Epidota incipiente observada a -602 msnm.

Zona epidota-clorita-illita-wairakita: De -1015 msnm hasta -1753 msnm. Se da el desarrollo de epidota (la cual no es necesariamente abundante), principalmente entre -1015 msnm y -1219 msnm, y de -1419 msnm hasta el fondo del pozo en cantidades de trazas, la cual ocurre como relleno de venas y como producto de alteración de plagioclasa. Análisis petrográficos muestran que, de -1007 a -1091 msnm, pennina, cuarzo, calcita, wairakita e illita, con presencia de epidota (1-7%) y ocasionalmente prehnita y anhidrita, controlan la alteración, infiriéndose una temperatura de alrededor de 220° a 250° C. Además, de -1202 msnm a -1781 msnm, se identifica una reducción de pennina, contrario a una consistente ocurrencia de clorita y abundancia de wairakita, illita y hematita. La presencia de abundante wairakita a -1654 y -1722 msnm reemplazando cristales de plagioclasa y rellenando oquedades indica alta permeabilidad. Illita a esta profundidad implica alteración hidrotermal con temperatura excediendo los 230° C.

## **CAPÍTULO VI: CORRELACIÓN DE DATOS**

Para la correlación de datos se sintetizaron los resultados de los análisis realizados a los pozos incluidos en los 3 perfiles creados, los cuales se encuentran distribuidos en la parte central o productiva del campo geotérmico de San Jacinto-Tizate. La figura 7, que se encuentra en el acápite 4.2 muestra la ubicación de cada perfil dentro del área de estudio.

Por cada perfil se realizaron 2 análisis. El primero corresponde a una correlación lito-estratigráfica, graficada en base a la subdivisión del subsuelo en unidades estratigráficas definidas por Ostapenko *et al* (1998), y ajustada para los pozos nuevos. El segundo análisis corresponde a una correlación mineralógica, donde se grafican las zonas mineralógicas identificadas en base al análisis de recortes y de láminas delgadas.

Los perfiles de correlación se crearon utilizando el programa AutoCad Architecture, donde se graficaron las unidades estratigráficas en base a la litología, y las zonas hidrotermales en base a la temperatura de formación de los minerales encontrados en los análisis petrográficos.

## 6.1 CORRELACIÓN LITO-ESTRATIGRÁFICA

Se describen a continuación las interpretaciones de los 3 perfiles de correlación lito-estratigráfica y sus respectivas figuras. Ver Tablas de Resumen de Unidades en Anexo D.

### 6.1.1 Correlación lito-estratigráfica del Perfil Noreste-Suroeste (A-A')

Este perfil (Figura 14) se conforma por dos pozos direccionales (SJ9-2 y SJ12-2) y un pozo vertical (SJ5-1). En él se correlacionan las 3 unidades definidas por Ostapenko *et al* (1998).

La Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes) varía en espesores, siendo 85, 115 y 78 m, en los pozos SJ12-2, SJ5-1 y SJ9-2, respectivamente. Se caracteriza por una secuencia de depósitos volcánicos recientes, como lavas y tobas de composición similar, y materiales volcanoclásticos retrabajados, principalmente en los niveles superiores.

La Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas) se presenta en los 3 pozos con espesores que van desde 303 hasta 570 m, siendo el pozo SJ5-1 en el cual presenta mayor potencia. Se caracteriza por una heterogeneidad en las lavas, clasificándose y siendo mayoritarias las de composición andesítica y en menores intercalaciones, las de composición andesito-basálticas, así como menores cantidades de tobas cristalinas y litocristalinas

La Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas) es la que tiene mayor desarrollo en dirección Sur, iniciando por una potencia de 402 m en el pozo SJ12-2, seguido por 680 m en el pozo SJ5-1 hasta finalmente tener 995 m de potencia en el pozo SJ9-2. Esto se debe a que la unidad anterior fue poco desarrollada en la zona que intercepta el pozo SJ9-2, y por ende, hubo un amplio desarrollo de la tercer unidad, caracterizada por amplios paquetes de lavas andesíticas, y menores intercalaciones de lavas andesito-basálticas, así como secuencias monótonas de tobas con carácter retrabajado y caótico que se extienden hacia el Norte, esto evidenciado en el porcentaje de toba litocristalina encontrado en esta unidad para el pozo SJ12-2, correspondiente al 49% del total perforado en el pozo.

Más a profundidad, es predominantemente compuesta por lavas de composición andesítica, dispuesta en capas de mediano grosor (entre 10 y 260 m), con evidente oxidación y en partes silicificada, y medianamente intercalada con pequeños paquetes de toba de composición predominante litocristalina a líticos dominantes. Se caracteriza por su nivel de oxidación,



tanto en lavas como en tobas, las cuales fueron clasificadas por Ostapenko *et al* (1998) como “lutitas y areniscas rojas”, pero en esta revisión no se pudo comprobar esa teoría.

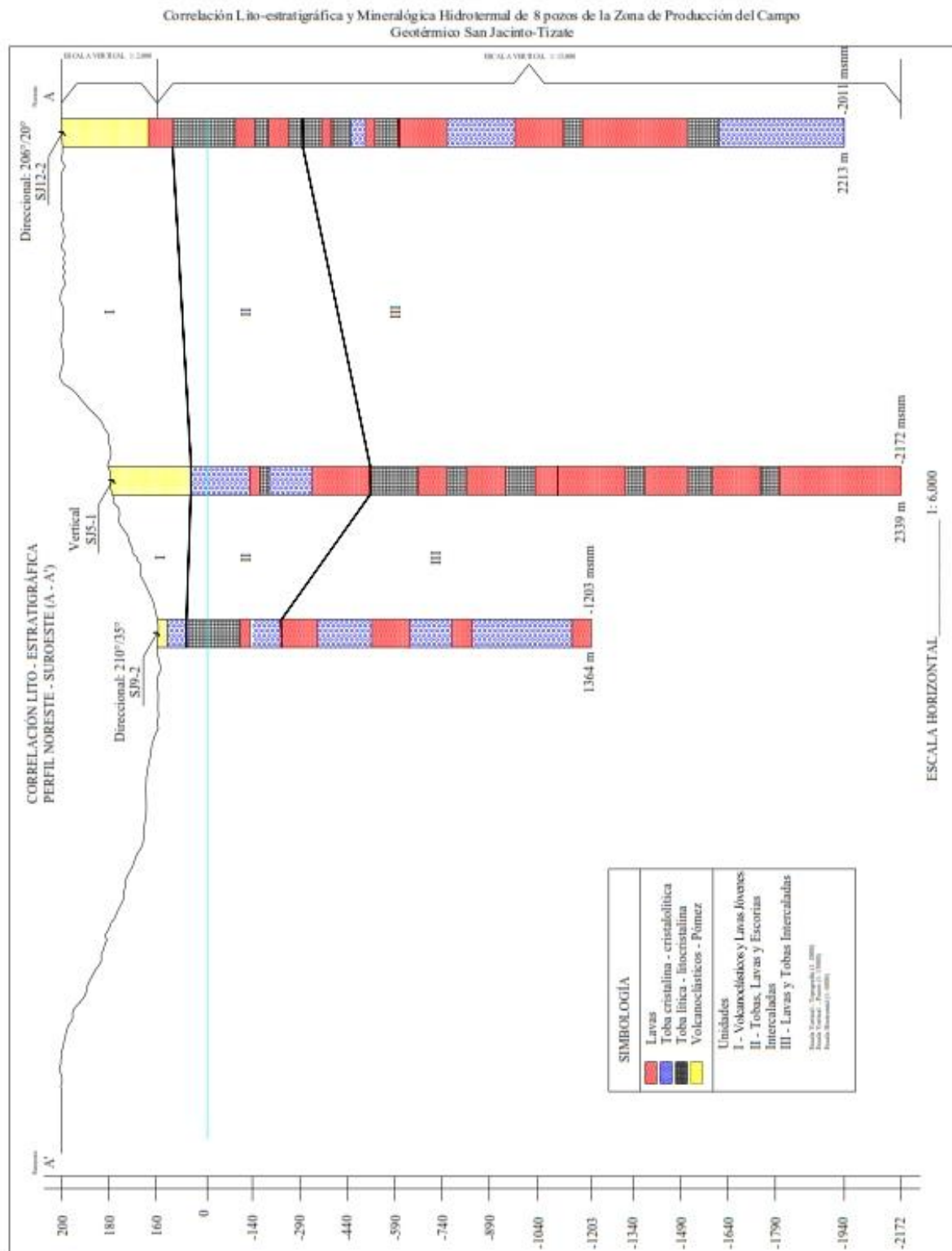


Figura 14: Correlación Litoestratigráfica del perfil Noroeste - Suroeste

### 6.1.2 Correlación lito-estratigráfica del Perfil Este-Oeste (B-B')

La correlación de las unidades en este perfil es uniforme, no hay mucha variación vertical en los espesores de cada unidad, así como cambios significativos en la litología entre los pozos. Este perfil es conformado por dos pozos verticales (SJ3-1 y SJ5-1) y un pozo direccional (SJ12-3) (Figura 15).

La Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes), encontrada en el pozo SJ3-1 con un espesor de 105 m, en el pozo SJ5-1 con 115 m, y en el pozo SJ12-3 con 94 m. Compuesta por fragmentos tobáceos litocristalinos, pero principalmente por lava de composición andesítica y menor andesito-basáltica, las cuales se hacen menores en espesor hacia el Este, dando lugar a la presencia de piroclastos retrabajados, escorias y pómez, principalmente encontrado en el pozo SJ12-3 a escasos metros de profundidad.

La Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas) se compone, a lo largo de todo el perfil, de intercalaciones de lavas de composición andesítica a andesita-basáltica, tobas que varían en su composición de cristalinas a cristalolíticas, con incremento en el contenido de líticos en dirección Este (hacia el pozo SJ12-3), donde predominan las líticas sobre las cristalinas. Los espesores experimentan un ligero incremento en dirección Este, siendo en el pozo SJ3-1 de 550 m, en el pozo SJ5-1 de 570 m, y en el pozo SJ12-3 de 647 m.

La Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas) es caracterizada por Ostapenko *et al* (1998) por ser heterogénea en su composición, resultando en la zona de El Tizate (donde se ubica el área de estudio) principalmente compuesta por espesas secuencias de lavas andesíticas masivas, demostrado en cada uno de los pozos de este perfil. Las lavas se presentan en gruesas capas, frescas a alteradas, algunas brechadas y mezcladas con fragmentos de toba, sin embargo se observa una disminución en potencia hacia el Este, donde abundan paquetes de tobas litocristalinas a líticas sobre las lavas.

Además, esta unidad es igualmente caracterizada por una alta intensidad de oxidación a profundidad, tanto en materiales lávicos como tobáceos, lo que la hace distintiva respecto a la parte superior. El límite de esta parte está generalmente marcado por la constancia en la intensidad de oxidación de las rocas. En el pozo SJ12-3 se encontró, a los -1755 msnm, un

paquete de andesita + diorita, presumiblemente parte del intrusivo diorítico localizado al Este del Campo.

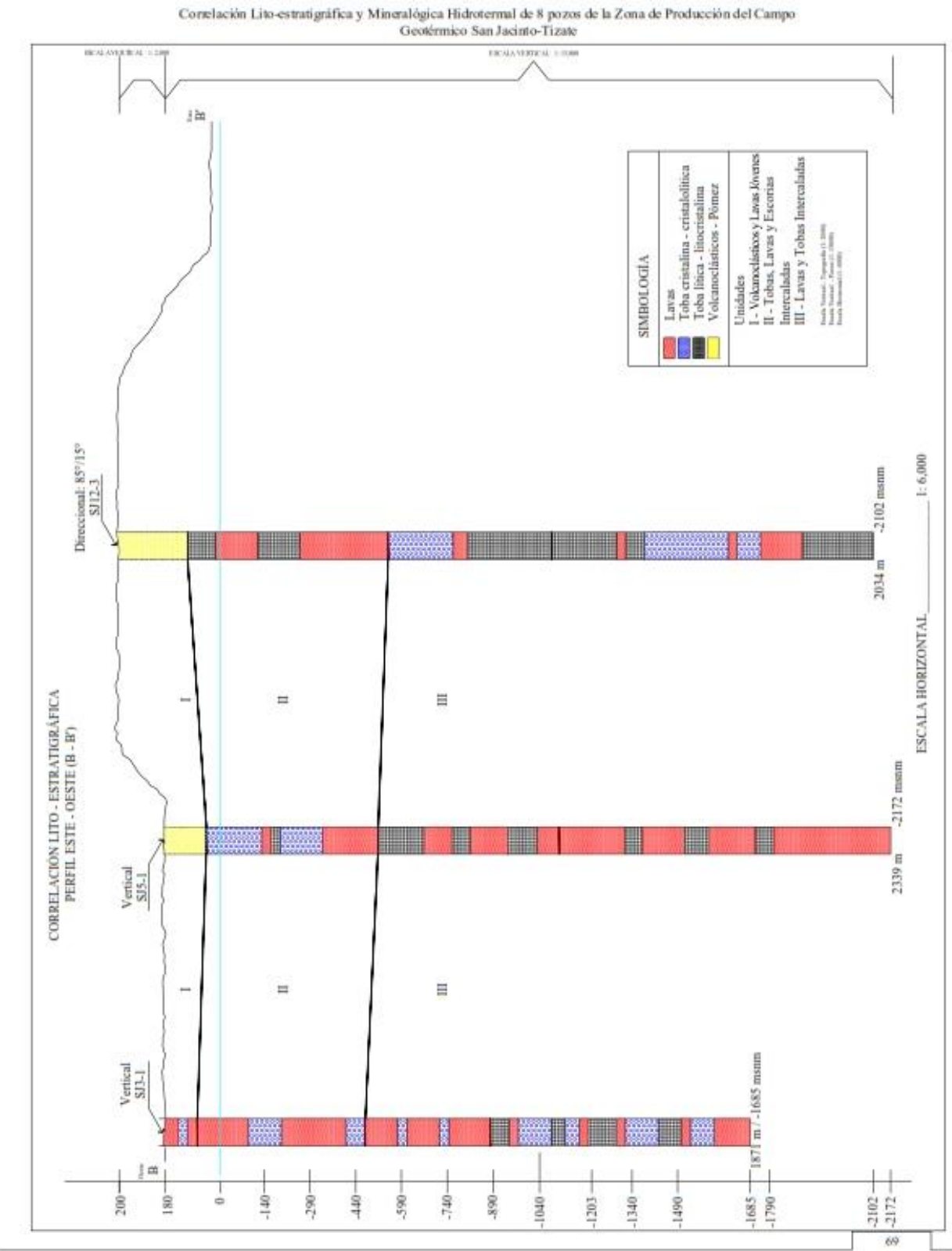


Figura 15: Correlación Litoestratigráfica del perfil Este - Oeste

### 6.1.3 Correlación lito-estratigráfica del Perfil Noroeste-Sureste (C-C')

La correlación de las unidades en este perfil es uniforme (Figura 16), no hay mucha variación vertical en los espesores de cada unidad, así como cambios significativos en la litología entre los pozos. Solamente se observa un ligero desarrollo de la Unidad 3 en el pozo SJ9-3F debido al ángulo del pozo, además de destacar que el pozo SJ9-1 termina en la unidad mencionada. Este perfil es conformado por un pozo vertical (SJ6-1) y dos pozos direccionales (SJ9-1 y SJ9-3F).

La Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes), como en los perfiles anteriores, comprende productos piroclásticos y depósitos retrabajados, y rocas volcánicas recientes de composición andesítica, y paquetes de toba con predominancia cristalina. En esta unidad se observa un decrecimiento en el contenido de lavas a medida que se avanza hacia el Este (pozo SJ9-3F), y por ende, un aumento de las tobas cristalinas. Comprende un espesor de 120 m, el cual se mantiene uniforme a lo largo del perfil.

La Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas) comprende una progresión similar a la unidad anterior en cuanto al porcentaje de lavas de composición andesítica y andesito-basáltica, el cual muestra un decrecimiento en dirección Este, donde predominan las tobas de composición cristalina a lítica, encontrándose algunas brechadas y recrystalizadas. El espesor de esta unidad es mayor en el pozo occidental SJ6-1 (455 m) que en los pozos orientales SJ9-1 y SJ9-3F (276 y 256 m, respectivamente).

La Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas) se presenta homogénea en la parte superior del pozo SJ6-1, encontrándose totalmente lávica en los 555 m iniciales de espesor, donde se presenta de composición andesítica afanítica silicificada, mientras que a medida que avanza hacia el Este adquiere un carácter heterogéneo encontrándose lava andesítica intercalada con paquetes tobáceos cristalinos y lítocristalinos. Esta unidad es la máxima alcanzada por el pozo SJ9-1, el cual consigue su fondo de pozo a los 1200 mMD.

Por otro lado, se encuentra heterogénea, comprendiendo predominantemente lavas andesíticas y menores paquetes tobáceos de carácter lítico dominante en el pozo SJ6-1, a ser mayoritariamente tobácea en el pozo SJ9-3F, donde se halla una secuencia volcanoclástica de tobas líticas y cristalinas sobreyaciendo a una capa de lava andesítica de espesor

significante, para abrirse paso a una intercalación de lavas y tobas con sedimentos lutíticos fuertemente oxidados a los -1685 msnm. El límite inferior para esta unidad en el pozo SJ6-1 es indefinido, dado que la última recuperación de recortes fue a los 1660 mMD.

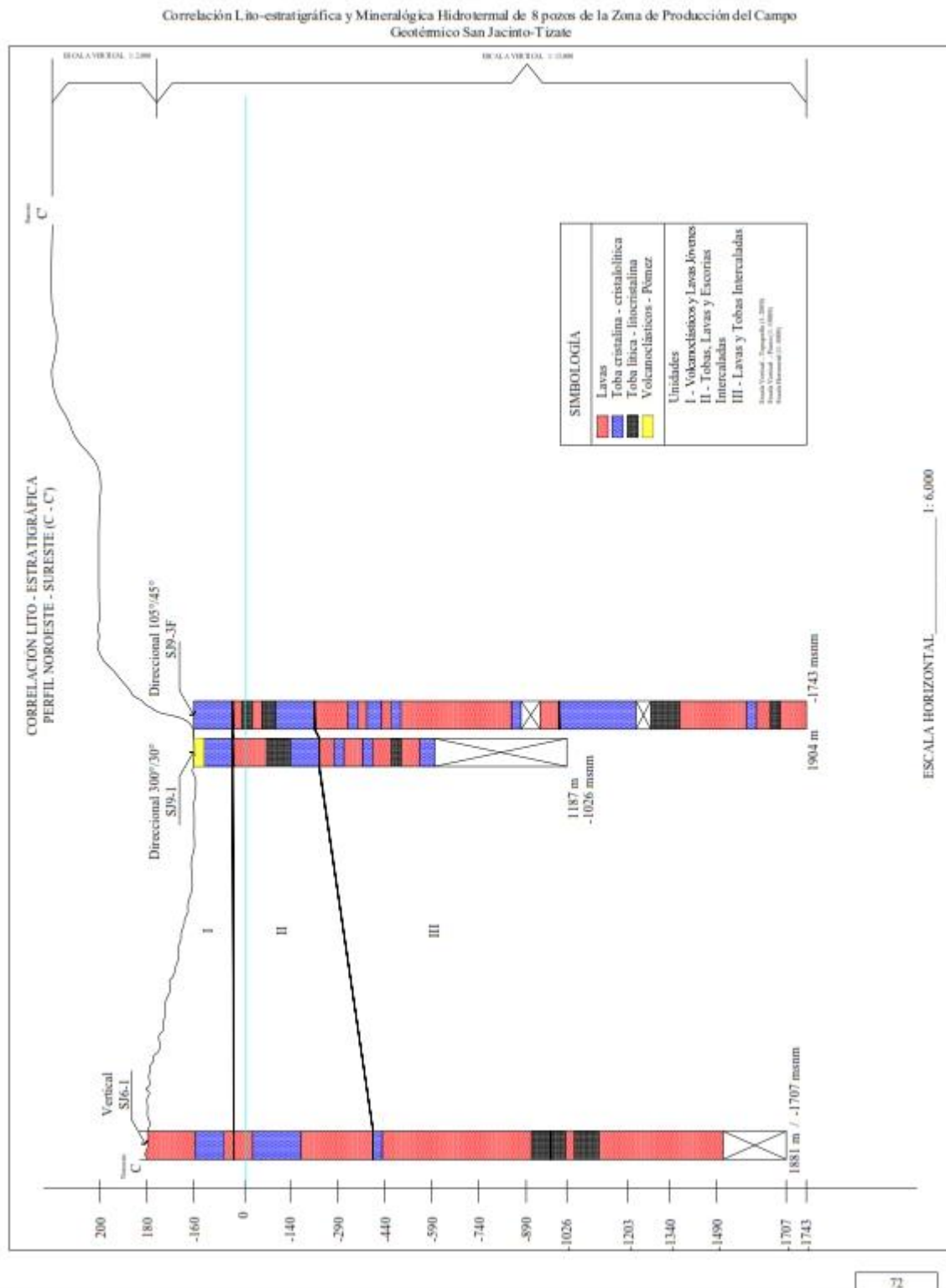


Figura 16: Correlación Litoestratigráfica del perfil Noroeste - Sureste



## 6.2 CORRELACIÓN MINERALÓGICA

La zonificación mineralógica tentativa en estos pozos está principalmente basada en análisis de recortes de perforación y láminas delgadas, y en la recopilación de los resultados de pruebas de azul de metileno y de Difracción de Rayos X. Se describen a continuación las interpretaciones de los 3 perfiles de correlación mineralógica y sus respectivas figuras.

### 6.2.1 Correlación mineralógica del Perfil Noreste-Suroeste (A-A')

Se subdivide en 3 zonas: Zona esmectita-zeolita, Zona arcillas intercaladas-clorita-illita y Zona epidota-clorita-illita-wairakita (Ver Figura 17).

#### **Zona esmectita-zeolita**

La zona de alteración de más baja temperatura ocurre con un espesor entre 732 y 960 m, siendo su punto más grueso en el pozo SJ5-1 y la menor potencia en el pozo SJ9-2. Esta zona se caracteriza por la presencia de zeolitas y arcillas de baja temperatura, incluyendo esmectita y caolinita, y la aparición de illita-esmectita y clorita-esmectita en la base de la zona. Dentro de las zeolitas se encontraron cambios progresivos en su cristalización de acuerdo a la temperatura, hallándose estilbita, chabazita, clinoptilolita y trazas de laumontita en el pozo SJ12-2. En el pozo SJ5-1 se encontraron pequeños cristales de anhidrita sobre cuarzo a los 38 y -97 msnm, lo cual podría indicar proceso de recalentamiento. En este mismo pozo se identificaron zeolitas tipo natrolita y mordenita. En el pozo SJ9-2, a los -529 msnm se da la primera aparición de prehnita, junto a una evidente aparición de clorita de tipo clinocloro.

#### **Zona arcillas intercaladas-clorita-illita**

Esta zona es meramente transicional entre la zona dominada por arcillas y la zona de alteración de más alta temperatura, caracterizándose por el desarrollo de illita y clorita, principalmente. Se encuentra con un espesor variable, siendo en el pozo SJ12-2 de 469 m, y disminuyendo hacia el Sur, con 405 m de espesor en el pozo SJ5-1 y 258 m en el pozo SJ9-2. Al inicio de esta zona, la illita generalmente se encuentra en proporciones de 80:20 a 90:10 en la arcilla intercalada illita-esmectita. En el pozo SJ12-2 se da la aparición de adularia en proporciones de 10-30% en lavas alteradas, y la zeolita tipo laumontita aparece extensivamente en las lavas de -727 y -865 msnm. En el pozo SJ5-1 se reconoce fácilmente el desarrollo de la clorita tipo pennina, así como escasos cristales de anhidrita y epidota entre

-802 y -1032 msnm. En el pozo SJ9-2, se reconoce prehnita y calcedonia radiada a los -571 msnm, además de clinocloro y adularia, a los -829 msnm.

### **Zona epidota-clorita-illita-wairakita**

En el pozo SJ12-2 se presenta con una potencia de 998 m. La epidota aparece a partir de los -1096 msnm. La adularia, con su proporción máxima en 34% a los -1693 msnm, como material de vena y reemplazo de plagioclasas. El anfíbol actinolita se encontró en las 3 muestras profundas de láminas delgadas (-1693, -1834 y -1980 msnm). En el pozo SJ5-1, donde su espesor aproximado es de 969 m, aparecen y se desarrollan epidota, adularia, anhidrita, prehnita, actinolita y wairakita. Laumontita y wairakita se hallan rellenando espacios intersticiales. En el pozo SJ9-2 se continúa la asociación mineralógica, además de anhidrita encontrada a los -1120 msnm. En este pozo el espesor es de 383 m.

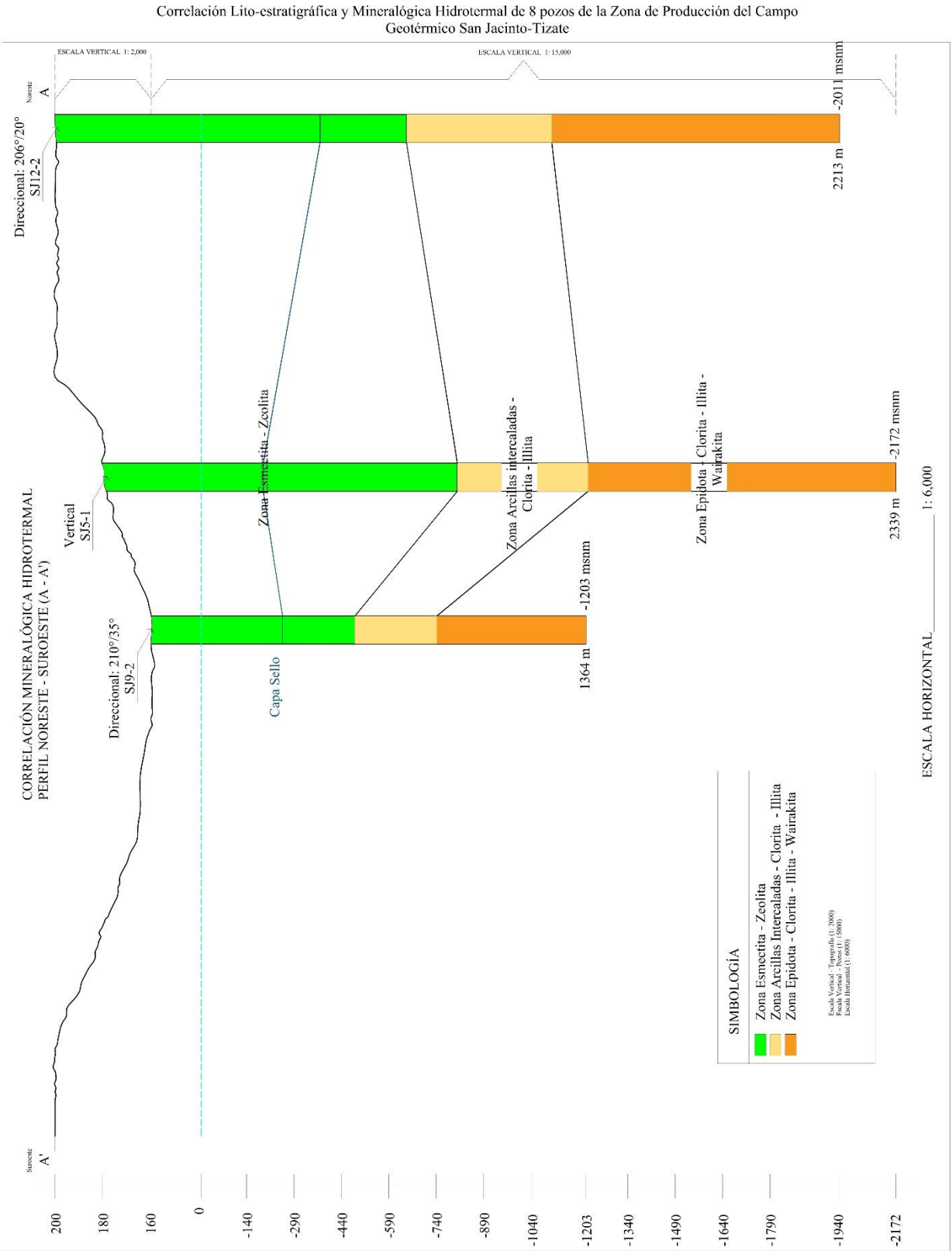


Figura 17: Correlación Mineralógica Hidrotermal del perfil Noreste - Suroeste

### 6.2.2 Correlación mineralógica del Perfil Este-Oeste (B-B')

Se subdivide en 3 zonas: Zona esmectita-zeolita, Zona arcillas intercaladas-clorita-illita y Zona epidota-clorita-illita-wairakita (Ver Figura 18).

#### **Zona esmectita-zeolita**

Esta zona varía en espesores, empezando por 800 m en el pozo SJ3-1, 960 m en el pozo SJ5-1 y 547 m en el pozo SJ12-3. Esto podría indicar que la capa sello es más amplia en el sector Oeste del perfil, abundan los minerales arcillosos, calcita, óxidos de hierro, pirita y cuarzo hidrotermal. Por difracción se encontró en el pozo SJSJ12-3 menores cantidades de calcedonia, siderita, estilbita y adularia.

#### **Zona arcillas intercaladas-clorita-illita**

En el pozo SJ3-1, los minerales del grupo de la clorita alcanzaron su proporción máxima de 7% a los -954 msnm, a partir de esta profundidad se observó un decrecimiento en el contenido de arcilla illita y clorita ocasionada por una sustitución de óxidos férricos, reapareciendo de nuevo a partir de los -1554 msnm. Prehnita y epidota en trazas, a los -954 y -1289 msnm respectivamente. En el pozo SJ12-3 se identificaron en muestras de esta zona minerales de adularia, laumontita, dolomita, siderita, estilbita y calcedonia.

#### **Zona epidota-clorita-illita-wairakita**

Esta zona solamente se desarrolló en los pozos SJ5-1 y SJ12-3, siendo éste último en el cual el espesor es más grande, 1442 m respecto a 969 del pozo SJ5-1, lo cual indica que el pozo SJ12-3 tiene mayor desarrollo de minerales de un reservorio de alta temperatura. En este perfil, esta zona denota el desarrollo de epidota como mineral de reemplazo y de relleno de vena, en cristales euhedrales. Además, se encontraron adularia, anhidrita, prehnita, actinolita y wairakita, y en menores cantidades clorita de tipo clinocloro y pennina e illita.

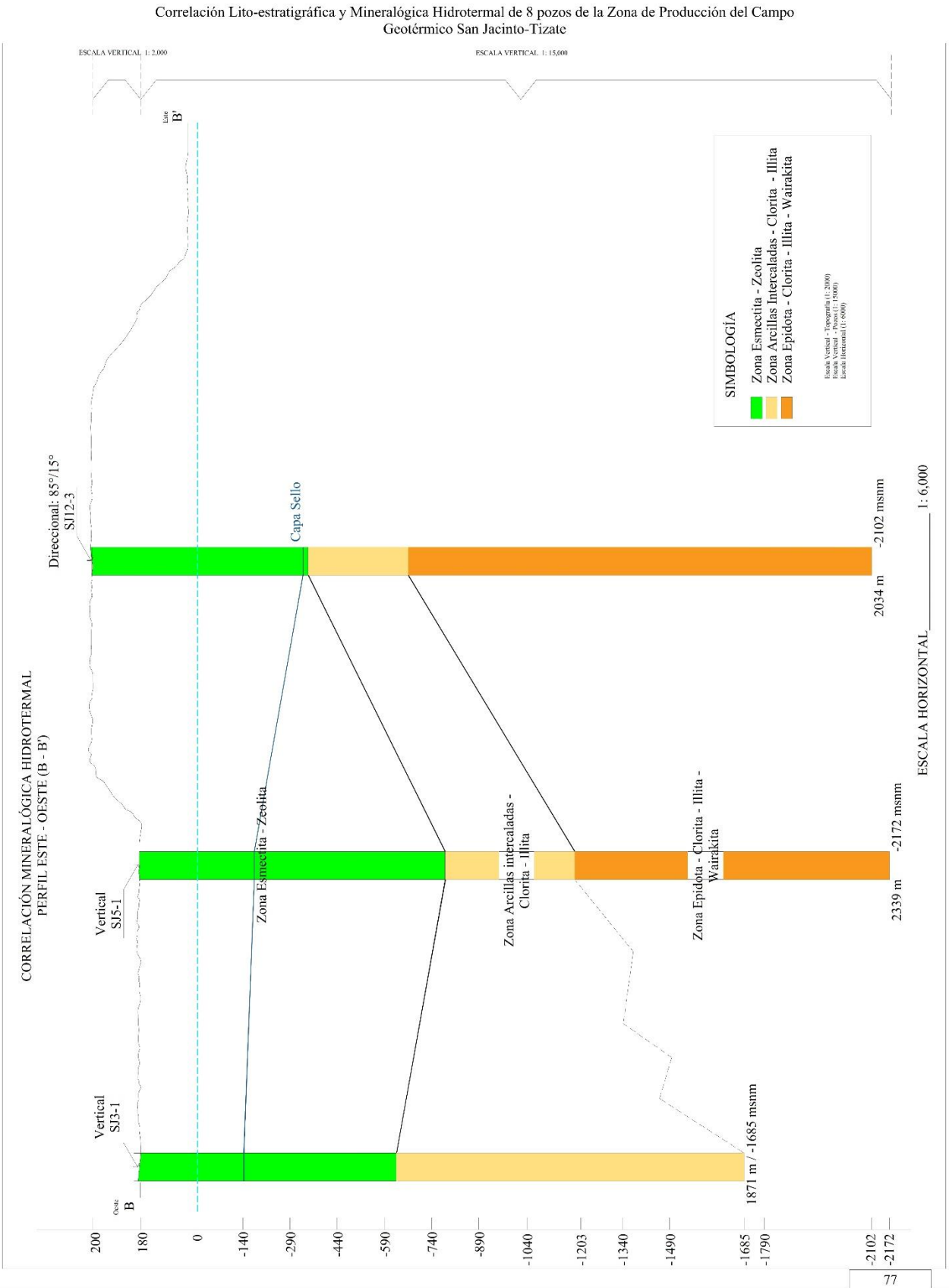


Figura 18: Correlación Mineralógica Hidrotermal del perfil Este - Oeste

### 6.2.3 Correlación mineralógica del Perfil Noroeste-Sureste (C-C')

Se subdivide en 3 zonas: Zona esmectita-zeolita, Zona arcillas intercaladas-clorita-illita y Zona epidota-clorita-illita-wairakita (Ver Figura 19).

#### **Zona esmectita-zeolita**

Igualmente a los perfiles anteriores, esta zona es netamente arcillosa, aunque en el pozo SJ6-1 se da un desarrollo pobre de zeolitas, al encontrarse solamente un agregado cristalino de natrolita y anhidrita a los 68 msnm. En este pozo el espesor de esta zona es de 800 m. En los primeros cientos de metros del pozo SJ9-1 se presenta la típica asociación mineralógica, hasta los -572 msnm que es donde aparece laumontita reemplazando clinoptilolita y estilbita, además de adularia a los -289 msnm. Se reporta epidota incipientemente, en cantidades menores al 1% a los -457 msnm. Calcita y arcillas de tipo esmectita son abundantes a lo largo de todo el pozo, al igual que clinocloro, cuarzo y piritita. Se encuentra en pequeñas cantidades anhidrita y prehnita. Esta zona se extiende a lo largo de todo el pozo, debido a la inconsistencia en las asociaciones mineralógicas, por ejemplo, la zeolita tipo laumontita no es usualmente estable más allá de 220° C, mientras que la epidota ocurre a más de 240° C, y el alto contenido de arcillas esmectíticas. En el pozo SJ9-3F los minerales de relleno de venas incluyen zeolita, calcedonia, cuarzo y calcita.

#### **Zona arcillas intercaladas-clorita-illita**

En esta zona transicional es común encontrar asociaciones similares a la de perfiles anteriores, salvo que en el pozo SJ6-1 la clorita tipo pennina no se desarrolla, únicamente la de tipo clinocloro, además de identificarse wairakita mediante difracción. El espesor de esta unidad en este pozo es de 600 m. En el pozo SJ9-3F se presenta con una potencia de 476 m, se encontró clorita tipo pennina a los -602 msnm mediante análisis petrográfico, y ocasionalmente prehnita y anhidrita, mayormente rellenando oquedades y reemplazando matriz y cristales. Se observó epidota incipiente a los -602 msnm.

#### **Zona epidota-clorita-illita-wairakita**

El contenido de epidota en estos pozos para esta zona no es considerablemente abundante, ocurriendo mayormente en venas y reemplazo de plagioclasas. En el pozo SJ6-1 se da la aparición incipiente de prehnita y anhidrita a los -1226 y -1381 msnm, respectivamente. En

el pozo SJ9-3F se da la presencia de abundante wairakita entre -1654 y -1722 msnm, lo cual indica alta permeabilidad. El contenido de illita se mantiene alto en toda la zona, lo cual indica temperaturas que exceden los 230°C, sumado a la presencia de epidota, prehnita y anhidrita.

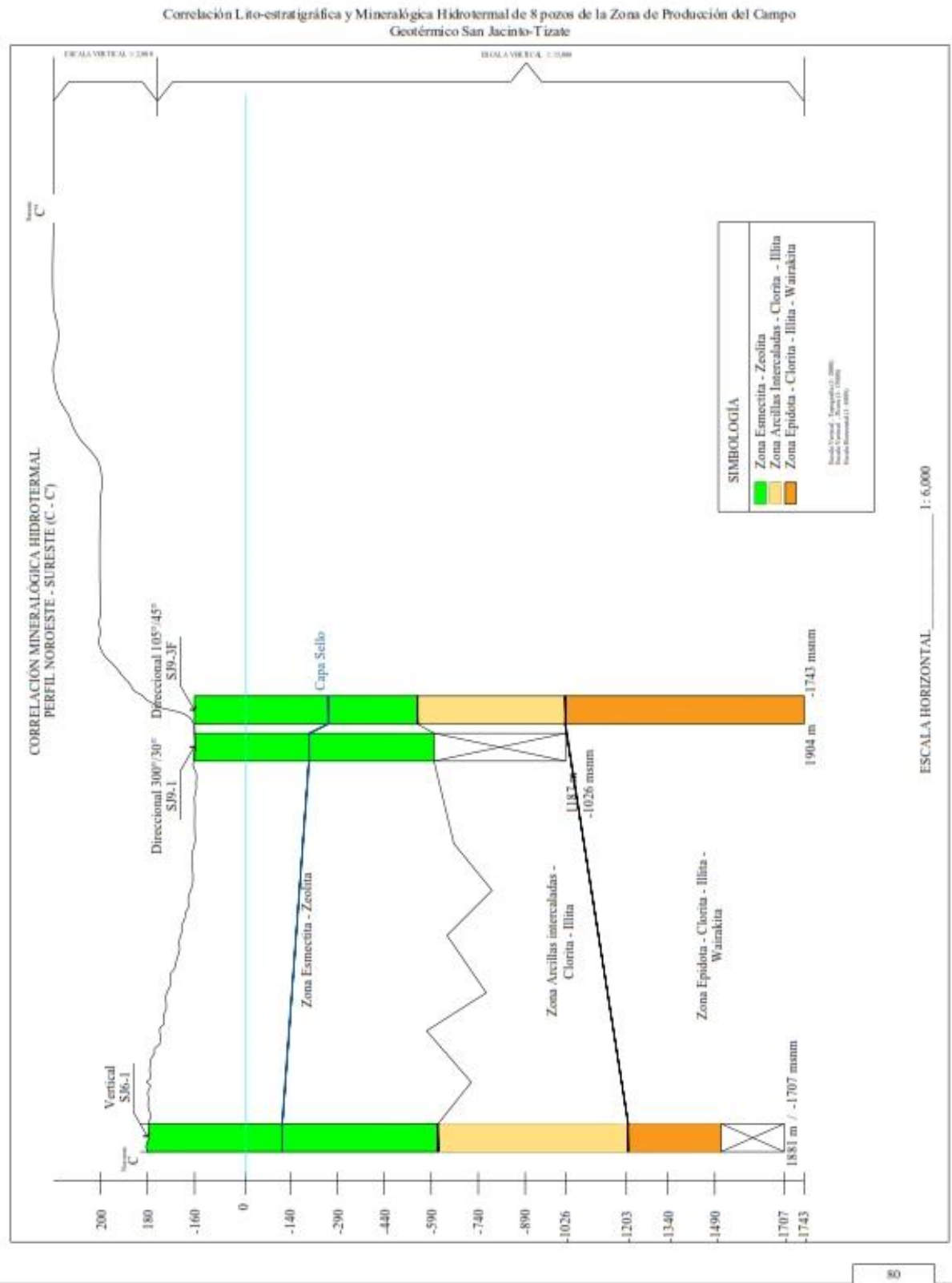


Figura 19: Correlación Mineralógica Hidrotermal del perfil Noroeste - Sureste



## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES**

El estudio estratigráfico y mineralógico ha sido realizado sobre 8 pozos del Campo Geotérmico San Jacinto-Tizate, escogidos oportunamente en la zona productiva para obtener el máximo de la información en función del material disponible e importancia del sector.

El trabajo realizado ha permitido definir con buen detalle las condiciones geológicas-estratigráficas y mineralógicas del subsuelo de esta zona del campo hasta la profundidad de -2167 msnm (TVD). Los demás pozos se encuentran en profundidades a partir de -1212 msnm.

En total, se estudiaron 15341 metros de columnas estratigráficas, basándose sobre la observación de recortes de perforación, sobre el análisis de los “master logs” de los pozos y, principalmente, sobre el estudio petrográfico de 110 láminas delgadas de recortes representativos (todas ya existentes).

Por cada pozo se revisó la columna litológica de manera detallada; sucesivamente, tomando en cuenta la distribución de los cuerpos litológicos en el subsuelo, se agruparon paquetes de roca en unidades lito-estratigráficas, tomando como base la definición de unidades presentada por Ostapenko *et al* (1998).

La interpretación geológica de dichas unidades ha evidenciado una larga persistencia de la actividad volcánica en el área, que ha generado una secuencia de más de 2000 metros de espesor, de productos volcánicos y escasos volcano-sedimentarios de edad variable entre el Mioceno Inferior o Tardío y el Holoceno.

En particular, desde arriba hacia abajo, se reconocieron las siguientes unidades:

- Unidad 1 (Volcanoclásticos y Lavas Jóvenes) – Correspondiente al vulcanismo cuaternario de la Cordillera de Los Maribios, incluyendo productos del Volcán Santa Clara y del Complejo Volcánico Telica, así como de pequeños focos eruptivos, principalmente evidenciados en la zona Noreste de la zona (pozos SJ12). Su base se encuentra a profundidades variables entre 41 y 202 msnm. Dicha unidad se compone por depósitos volcánicos holocénicos, incluyendo andesitas y tobas de composición similar, así como sedimentos aluviales que rellenan la Depresión San Jacinto.

- Unidad 2 (Tobas, Lavas y escorias intercaladas) – Esta unidad está compuesta de lavas de composición andesítica y andesita-basáltica, con intercalaciones de tobas y escorias, variando en proporción en cada uno de los perfiles. En el perfil Noreste-Suroeste inicia mayormente tobácea en el pozo SJ12-2, y se vuelve más lávica a medida que avanza hacia el Sur. En el perfil Este-Oeste, manteniéndose teóricamente invariable, con intercalaciones de lavas andesíticas, tobas y escorias. Y en el perfil Noroeste-Sureste, volviéndose más lávica que tobácea en dirección hacia el Oeste.
- Unidad 3 (Lavas y Tobas intercaladas) – Esta unidad está principalmente compuesta por espesas secuencias de lavas andesíticas masivas en la parte central del área de estudio, excepto en las profundidades que se encuentra esta unidad en los pozos SJ12-2, SJ12-3 y SJ9-2, donde tiene un comportamiento más tobáceo que lávico, y predominando con la característica común entre algunos pozos de presentarse con alteración fuerte a óxidos de hierro.

Desde el punto de vista mineralógico, los resultados del presente estudio permiten hacer una correlación mineralógica hidrotermal en el área de estudio, definiéndose las siguientes zonas de alteración hidrotermal:

- Zona esmectita-zeolita: Se caracteriza por la presencia de minerales arcillosos (esmectita, montmorillonita) sílice amorfa y zeolitas de baja temperatura, como estilbita, natrolita y laumontita. Esta zona representa baja temperatura, en un rango entre 50 °C y 150 °C.
- Zona arcillas intercaladas-clorita-illita: Aumenta la intercalación de arcillas illita - esmectita y clorita-esmectita y aparecen los de la fase de los filosilicatos, esencialmente clorita e illita. Además que aparecen en la parte más profunda de la zona. El rango de temperaturas de formación es entre 150 °C y 230 °C.
- Zona epidota-clorita-illita-wairakita: Los minerales son epidota, albita, wairakita, adularia, clorita, cuarzo, pirita, calcita, illita, prehnita y óxidos de hierro subordinados, y en esporádicas apariciones, actinolita. La epidota es el mineral índice de mayor abundancia en esta zona. Disminuye la presencia de zeolitas de media

temperatura y minerales arcillosos. El rango de temperaturas de formación es entre 230 °C y 260 °C.

Estas zonas de alteración se encuentran ampliamente distribuidas y desarrolladas en el área, que podría corresponder a la zona principal de ascenso de fluidos del campo. Además, la zona de alteración más profunda refleja depositación directa en el sistema geotermal, y la ocurrencia de minerales de alta temperatura tales como epidota, actinolita, wairakita y prehnita sugieren temperaturas alrededor de 280° C.

## **CAPÍTULO VIII: RECOMENDACIONES**

Se recomienda hacer un análisis mineralógico de mayor detalle incluyendo elementos fundamentales para su realización, tales como perfiles de Presión y Temperatura Estabilizada, análisis de Inclusiones Fluidas, y análisis de Microsonda de electrones (Electron Microprobe); los cuales, debidamente conjugados, aportarían una visión más certera sobre el sistema geotermal.

Además, la realización de análisis de Difracción de Rayos X en los pozos perforados por Intergeoterm (pozos SJ3-1, SJ5-1 y SJ6-1, en este estudio), así como cualquier otro pozo que no tenga estos registros.

De igual manera, ampliar la densidad de láminas delgadas por pozo, ya que en algunos de éstos son escasas, principalmente en los pozos del primer Proyecto (pozos SJ1-1 al SJ7-1).

Ampliar los elementos para la realización integral de la correlación lito-estratigráfica, tales como registros de permeabilidad y estudios de Micro-imagen de Formación (Formation Micro-Imaging-FMI), para una mejor comprensión del comportamiento a profundidad de las fallas interpretadas superficialmente.

Tratar de aplicar la subdivisión lito-estratigráfica a los demás pozos del campo, mediante una revisión detallada de los recortes de perforación, “máster logs” y las pruebas de carotaje disponibles.

## **CAPÍTULO IX: BIBLIOGRAFÍA**

Acton, G., *et al*, 2000. Paleolatitude of the Caribbean Plate since the late Cretaceous.

Arnórsson, S, 2000. Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Development and Use. Sampling methods, data handling, and interpretation. International Atomic Energy Agency, Vienna.

Browne, P. R., 1978. Hydrothermal Alteration in Active Geothermal Fields, New Zealand Geological Survey.

Browne, P. R., 1984. Lectures on Geothermal Geology and Petrology. UNU-GTP.

Browne, P. R., 1993. Application of mineralogical methods to assess the thermal stabilities of geothermal reservoirs. Geothermal Institute and Geology Department, New Zealand.

Casallas, Y., Villatoro, D., 2014. Caracterización térmica de un reservorio geotérmico en una zona volcánica. PREG-LaGeo.

Comisión Nacional de Energía, 2001. Plan Maestro Geotérmico de Nicaragua, Volumen V: Evaluación del área de San Jacinto-Tizate.

Energy Geoscience Institute, 2011. Utah, U.S.A. Petrologic Investigation of Selected Samples from San Jacinto Wells:

- SJ9-3
- SJ12-2
- SJ12-3

González, E. *et al*, 1992. Distribución y condiciones de formación de los minerales de arcilla en un campo geotérmico-el caso de Los Humeros, Estado de Puebla. México.

Gunderson, R. *et al*, 2000. Analysis of smectite clays in geothermal drill cuttings by the methylene blue method: for well site geothermometry and resistivity sounding correlation.

Harvey, C. *et al*, 2004. Methylene blue adsorption: a real time rig geologist tool for estimating geothermal reservoir temperatures and forecasting drillhole stability problems.

Hodgson, G., 1998. Geología Histórica Regional e Historia Geológica Estructural Tectónica Simplificada de Nicaragua y América Central.

ICEIDA-MEM, 2008. Proyecto Formación de Capacidades en Geotermia. Ministerio de Energía y Minas.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), 2006. Hoja Topográfica de Telica, número 2853 IV.

Kristmannsdottir, H., 1979. Alteration of basaltic rocks by hydrothermal activity at 100-300°C. National Energy Authority, Iceland.

Lagat, J., 2004. Geology, hydrothermal alteration and fluid inclusion study of Olkaria Domes Geothermal Field, Kenya. UNU-GTP. MSc Thesis.

Lagat, J., 2010. Hydrothermal alteration mineralogy in geothermal fields with case examples from Olkaria Domes Geothermal Field, Kenya. United Nations University - Geothermal Training Programme (UNU-GTP).

Maksaev, V., 2001. Metalogénesis. Universidad de Chile.

Mesfin, K. G., 2010, Subsurface geology, hydrothermal alteration and geothermal model of Northern Skarðsmýrarfjall, Hellisheiði geothermal field, SW Iceland. MSc Thesis. Faculty of Earth Sciences, University of Iceland.

Moneer, A., 2015. Borehole Geology and alteration mineralogy of well He-52, Hellisheiði Geothermal Field, SW-Iceland. World Geothermal Congress, Australia.

Monterroso, L., 2013. Distribución y correlación de minerales de alteración de los pozos del campo geotérmico de San Vicente, El Salvador. Programa Regional de Entrenamiento Geotérmico-LaGeo (PREG).

Ostapenko, S., *et al*, 1995. A reservoir engineering assessment of the San Jacinto-Tizate Geothermal Field, Nicaragua. Intergeoterm.

Ostapenko, S., *et al*, 1998. San Jacinto-Tizate Geothermal Field, Nicaragua: Exploration and conceptual model.

Pérez, M., 1998. Propuesta de Correlación Litoestratigráfica del Campo Geotérmico de Ahuachapán, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. Ahuachapán, El Salvador.

Pichardo, C., 2013. Borehole Geology and hydrothermal alteration of well SV-5A, San Vicente Geothermal Field, El Salvador, C.A. PREG-LaGeo.

Polaris Energy Nicaragua, S.A. – SKM. Geology and Petrology reports:

- SJ9-1 (2008)
- SJ6-2 (2008)
- SJ9-2 (2008)
- SJ12-3 (2011)

- SJ9-3 (2014)

Quintero, R., 2010. Borehole Geology of well SJ9-2, San Jacinto-Tizate Geothermal Field, Nicaragua. PREG-LaGeo.

Reyes, A., 1998. Petrology and mineral alteration in hydrothermal systems: from diagenesis to volcanic catastrophes. UNU-GTP.

Rivera, M., 2004. Síntesis de la Geología Histórica de Nicaragua.

Ronoh, I., 2015. Appraising a geothermal field using hydrothermal alteration mineralogy: a case study of the East of Olkaria Domes Geothermal Field; Olkaria, Kenya. World Geothermal Congress, Australia.

SKM – Polaris Energy Nicaragua, S.A., 2005. San Jacinto-Tizate Geothermal Resource Assessment. Internal Report.

SKM, 2006. SKM Book of Hydrothermal Minerals.

SKM – Polaris Energy Nicaragua, S.A., 2008. Geoscientific study and review of the San Jacinto Geothermal System.

Teklemariam, M., 1985. Hydrothermal alteration in boreholes LA-3, LA-4 and LA-6 Langano-Aluto, Ethiopia. UNU-GTP.

Teklemariam, M. *et al*, 1996. Hydrothermal alteration in the Aluto-Langano Geothermal Field, Ethiopia.

Tschernich, R., 1992. Zeolites of the world. Geoscience Press Inc.

Van Reeuwijk, L., 1972. High temperature phases of zeolite of the natrolite group.

White, J., 2006. Primary volcaniclastic rocks.

White, P., 2015. Relict and modern epidote: lessons from Rantau Dedap, Sumatera.

## **CAPÍTULO X: ANEXOS**

### **ANEXO A**

**Tabla 1. Intervalos de profundidad de recortes de perforación revisados**

Intervalos de profundidad de recortes de perforación revisados (mMD)							
<b>SJ3-1</b>	<b>SJ5-1</b>	<b>SJ6-1</b>	<b>SJ9-1</b>	<b>SJ9-2</b>	<b>SJ9-3F</b>	<b>SJ12-2</b>	<b>SJ12-3</b>
05-85	0-275	5-370	18-733	12-1389	9-1372	15-2243	15-2390
95-115	315-340	400-1060			1421-1822	2258-2396	
125-255	370-400	1145-1535			1846-1921		
270-415	410-670	1555-1575			1933-1975		
430-450	690-700	1655-1660					
460-495	710-895						
505-515	905-985						
525-545	1000-1010						
555-960	1020-1095						
1020-1030	1105-1155						
1045-1100	1175-1210						
1100-1160	1225-1240						
1170-1310	1250-1745						
1320-1360	1755-2060						
1380-1870	2070-2105						
	2115-2170						
	2180-2275						
	2285-2330						



## ANEXO B

**Tabla 1. Profundidades de láminas delgadas revisadas y/o analizadas**

Profundidades de láminas delgadas revisadas y/o analizadas (mMD)							
SJ3-1	SJ5-1	SJ6-1	SJ9-1	SJ9-2	SJ9-3F	SJ12-2	SJ12-3
60	130	45	75	105	9	64	98
180	265	110	105	231	223	213	332
400	520	260	132	273	338	296	387
505	800	260	180	420	485	430	585
700	970	430	360	576	712	613	640
800	1200	600	450	690	964	710	689
1140	1380	900	510	723	1030	829	780
1475	1600	1250	558	732	1093	853	817
1600	1760	1400	618	963	1168	930	1015
1740	1995	1555		1071	1195	1067	1158
	2150	1660		1083	1252	1204	1201
	2260			1152	1363	1298	1295
				1230	1747	1399	1521
				1281	1823	1500	1704
				1350	1867	1673	1774
				1350	1942	1750	1811
				1434		1896	1832
				1527		2036	1957
				1632		2182	1978
				1725			2067
							2256
							2316
							2380

## ANEXO C

Tablas de Distribución de Litotipos en cantidad en metros (mMD) y porcentual (%) por Unidad Lito-Estratigráfica en cada uno de los pozos de los perfiles estudiados.

**Tabla 1. Distribución de litotipos en Perfil Noreste-Suroeste**

	SJ12-2								SJ5-1								SJ9-2							
	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
Pómez	19	22																						
Volcanoclásticos									5	4.3							24	30						
Andesita	51	60	187	44	49	12	783	57	70	60.8	250	44	380	56	605	62	15	20	126	42	408	41		
Andesita Basalto											10	1.75	55	8	20	2								
Toba cristalina			9	2	32	8	55	4	15	13.1	75	13.2					39	50	75	24	258	26		
Toba cristalolítica					125	31	141	10			25	4.4							60	20	143	14		
Toba litocristalina			85	20	196	49	387	28	25	21.7	70	12.3	55	8	205	21			24	8	184	19		
Toba lítica			146	34							35	6	100	15	105	11			18	6				
Escoria											25	4.4	30	4.4										
No muestras	15	18					16	1			80	14	60	8.8	39	4								
	Unidad I (85 m)		Unidad 2 (427 m)		Unidad 3 (402 m)		Unidad 4 (1382 m)		Unidad I (115 m)		Unidad 2 (570 m)		Unidad 3 (680 m)		Unidad 4 (969 m)		Unidad I (78 m)		Unidad 2 (303 m)		Unidad 3 (995 m)			

**Tabla 2. Distribución de litotipos en Perfil Este-Oeste**

	SJ3-1								SJ5-1								SJ12-3							
	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
Pómez															6	6								
Volcanoclásticos									5	4.3					17	18								
Andesita	50	48	310	56	345	64	326	48	70	60.8	250	44	380	56	605	62	56	60	375	58	162	30	452	41
Andesita Basalto			10	2	10	2					10	1.75	55	8	20	2								
Toba cristalina	10	9	95	18					15	13.1	75	13.2							66	10	24	5	69	6
Toba cristalolítica			30	5	45	8	35	5			25	4.4									60	11	129	12
Toba litocristalina	25	24	35	6	50	9	10	2	25	21.7	70	12.3	55	8	205	21			24	4	200	37	451	40
Toba lítica			20	4	15	3	275	40			35	6	100	15	105	11			182	28	90	17	12	1
Escoria	10	10	5	1			10	2			25	4.4	30	4.4										
No muestras	10	9	45	8	75	14	20	3			80	14	60	8.8	39	4	15	16						
	Unidad I (105 m)		Unidad 2 (550 m)		Unidad 3 (540 m)		Unidad 4 (676 m)		Unidad I (115 m)		Unidad 2 (570 m)		Unidad 3 (680 m)		Unidad 4 (969 m)		Unidad I (94 m)		Unidad 2 (647 m)		Unidad 3 (536 m)		Unidad 4 (1113 m)	

**Tabla 3. Distribución de litotipos en Perfil Noroeste-Sureste**

	SJ6-1								SJ9-1								SJ9-3F							
	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
Volcanoclásticos									18	15														
Andesita	20	16	205	46	475	86	290	38	9	7.5	132	48	214	27	9	8	103	40	605	79	383	46		
Andesita Basalto	30	23	5	1															22	3				
Toba cristalina	45	34	165	37					63	52.5	24	9	51	6	73	61	22	9	90	12	91	11		
Toba cristalolítica	25	19	40	8					6	5	93	34	45	6			116	45	37	4	129	16		
Toba litocristalina							20	3					27	3	28	23	15	6	15	2	138	16		
Toba lítica	5	4					110	15	6	5	27	9	3	<1										
Escoria																								
No muestras	5	4	40	8	80	14	321	44	18	15			467	58	9	8						90	11	
	Unidad I (130 m)		Unidad 2 (455 m)		Unidad 3 (555 m)		Unidad 4 (741 m)		Unidad I (120 m)		Unidad 2 (276 m)		Unidad 3 (804 m)		Unidad I (119 m)		Unidad 2 (256 m)		Unidad 3 (769 m)		Unidad 4 (831 m)			

## ANEXO D

Tablas de Resumen de Unidades por perfil de correlación.

**Tabla 1. Resumen de unidades de Perfil Noreste-Suroeste (A-A')**

Unidades	SJ12-2		SJ5-1		SJ9-2	
	Espesor (m)	Descripción	Espesor (m)	Descripción	Espesor (m)	Descripción
I	85	Pómez alterada a arcilla + lava	115	Prod. Piroclásticos, toba litocristalina, y lava AB.	90	Prod. Piroclásticos + lava AB + depósitos reabajados
II	427	Intercalación de tobas líticas+litocristalinas+lava andesítica	570	Lavas y tobas + escoria	303	Andesita + toba cristalina
III	1701	Toba>Lava. Tobas con delgados niveles de lava. Tobas litocristalinas, cristalolíticas.	1654	Lavas > tobas	971	Tobas > lavas. Intercalación de tobas cristalinas a líticas.

**Tabla 2. Resumen de unidades de Perfil Este-Oeste (B-B')**

Unidades	SJ3-1		SJ5-1		SJ12-3	
	Espesor (m)	Descripción	Espesor (m)	Descripción	Espesor (m)	Descripción
I	105	Lavas AB + escoria + toba cristalina a lítica	115	Prod. Piroclásticos, toba litocristalina, y lava AB.	94	Escoria + pómez + toba + lava andesítica
II	550	Lavas andesíticas + lava AB + escoria + tobas cristalinas y líticas	570	Lavas y tobas + escoria	647	Intercalaciones de lavas + tobas
III	1216	Lavas > Tobas. Lava andesítica + toba lítica a cristalina	1654	Lavas > tobas	1563	Tobas > Lavas.

**Tabla 3. Resumen de unidades de Perfil Noroeste-Sureste (C-C')**

Unidades	SJ6-1		SJ9-1		SJ9-3F	
	Espesor (m)	Descripción	Espesor (m)	Descripción	Espesor (m)	Descripción
I	130	Tobas > lavas. Tobas cristalinas + andesita + lava AB.	120	Prod. Piroclásticos + Depósitos reabajados + lava andesítica.	119	Tobas > lavas. Intercalación de tobas cristalinas y lavas andesíticas.
II	455	Lavas > tobas. Lavas andesíticas + poca lava AB + tobas cristalinas	276	Tobas > lavas.	256	Tobas cristalinas a líticas > lavas.
III	1296	Lavas	804	Lavas andesíticas	1529	Lavas > tobas cristalinas y líticas